

Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря Сікорського»
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра технології машинобудування
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Юрій Петраков
(підпис) (ім'я, прізвище)
“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

за освітньо-науковою програмою «Технології машинобудування»
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: оптимізація холостих рухів верстату з ЧПК за динамічними характеристиками

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи **МТ – 81мн**
(шифр групи)

Мілевський Валерій Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник

доцент. к.т.н. Малафєєв Ю.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент

доцент, к.т.н. Ковальов В.А.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

1. Тема дисертації Оптимізація холостих переміщень верстату з ЧПК за динамічними характеристиками
науковий керівник Малафєєв Юрій Михайлович, к.т.н., доцент.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від «04» березня2020р. № 800-с
2. Термін подання студентом закінченої дисертації «01» травня 2020р.
3. Об'єкт дослідження Холості переміщення інструменту при фрезеруванні на трьохкоординатному фрезерному верстаті з ЧПК. Технологічні переходи від поверхні до поверхні та в позицію зміни інструменту.
4. Предмет дослідження вплив послідовності виконання переходів та довжини виду траєкторії на допоміжний час, що витрачається на холосте переміщення верстату при зміні оброблюваної ділянки та при зміні інструменту в магазині.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Визначити основні підходи у формуванні загальних та окремих стратегій обробки деталей з складними поверхнями на трьохкоординатних верстатах з ЧПК. Пошук критерію оптимізації траєкторії холостого руху на верстатах з ЧПК. Розробка математичної моделі мінімізації холостих рухів при зміні оброблюваних

ділянок та інструменту на основі точкового опису геометрії деталі. Розробка алгоритму та методології побудови оптимальної траєкторії. Практичне підтвердження ефективності запропонованих рішень.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу Графічне зображення траєкторії холостого руху інструменту. Графічне зображення оптимізованих варіантів. Схема устаткування для визначення динамічних показників верстату. Зображення варіантів моделювання з обчислювальних програм.
7. Орієнтовний перелік публікацій: 1. Мілевський В. В. Оптимізація холостих переміщень інструменту при обробці на верстатах з ЧПК / В. В. Мілевський, Ю. М. Малафєєв. // Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Вітчизняна наука на зламі епох: проблеми та перспективи розвитку». – 2018. – №46. – С. 475–479.; 2. Мілевський В. В. Оптимізація холостих і робочих переміщень інструменту / В. В. Мілевський, Ю. М. Малафєєв. // Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні». – 2019. – №1. – С. 356–362.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Ознайомлення з технічною літературою.	10.09.2018-24.09.2018	
2	Пошук прикладів оптимізації траєкторії руху інструменту.	24.09.2018-08.10.2018	
3	Пошук власного критерію оптимізації траєкторії	08.10.2018-22.10.2018	
4	Пошук вже існуючих аналогів оптимальної траєкторії	22.10.2018-05.11.2018	
5	Визначення основних підходів формування загальних та окремих стратегій обробки деталей зі складною формою.	05.11.2018-26.11.2018	
6	Пошук в технічній літературі аналогічних підходів до створення математичної моделі оптимізації холостих рухів на верстатах з ЧПК.	26.11.2018-17.12.2018	
7	Створення власної математичної моделі оптимізації холостих переміщень на фрезерних верстатах з ЧПК	17.12.2018-14.01.2019	
8	Визначення динамічних характеристик фрезерних верстатів з ЧПК	14.01.2019-04.03.2019	
9	Пошук причин виникнення динамічних похибок	04.03.2019-25.04.2019	
10	Визначення шляхів вирішення та недопущення динамічних похибок	25.04.2019-18.05.2019	
11	Створення оптимізованих варіантів траєкторії холостого руху верстату з ЧПК	05.09.2019-15.10.2019	
12	Перевірка отриманих траєкторій на динамічну похибку, довжину та можливу швидкість руху нею.	15.10.2019-20.12.2019	
13	Перевірка отриманих результатів на виробництві	01.01.2020-01.03.2020	
14	Прорахунок економічної доцільності запровадження технології у виробництво	01.03.2020-30.03.2020	
15	Створення стартап проекту з оптимізації холостого руху на трьохкоординатних фрезерних верстатах з ЧПК	30.03.2020-27.04.2020	

Студент

(підпис)

Мілевський В.В.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Малафєєв Ю.М.

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему «Оптимізація холостих рухів верстату з ЧПК за динамічними характеристиками» складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку літератури та додатків. Головною метою магістерської дисертації є розробка системи рекомендацій щодо вибору траєкторій руху інструменту при обробці поверхонь складного профілю з метою скорочення допоміжного часу та загального пробігу обладнання. Продуктивність верстатів значною мірою покращується завдяки використанню систем CAD / CAM для генерації керуючої програм (NC). В даний час багато комерційних пакетів CAD / CAM, які забезпечують автоматичне програмування NC, розроблені та застосовуються для різних різальних процесів. Багато різальних процесів, оброблених верстатами з ЧПК. У даній роботі ми намагаємось знайти ефективний підхід розв'язання для визначення найкращої послідовності операцій для безлічі операцій, які розташовані в асиметричних місцях та на різних рівнях. Проаналізовано сучасний стан питання дослідження, розглянуто методи формування траєкторій руху інструменту, розглянуто їх переваги та недоліки, запропоновано методику розробки керуючих програм для обробки складних поверхонь деталі шляхом фрезерування на трьохкоординатному верстаті з ЧПК, запропоновано методику розробки планів вимірювання, створено систему рекомендацій щодо вибору траєкторій руху ріжучого інструменту при обробці складних за профілем деталей з метою скорочення допоміжного часу та траєкторії холостого руху. Результати роботи можуть бути використані на підприємствах задля підвищення точності механічної обробки відповідальних деталей складного профілю.

Ключові слова: ПОВЕРХНІ СКЛАДНОГО ПРОФІЛЮ, МЕХАНІЧНА ОБРОБКА, ХОЛОСТИЙ РУХ, ТРАЄКТОРІЯ РУХУ, ДОПОМІЖНИЙ ЧАС.

ABSTRACT

The master's dissertation on the topic "Optimization of idle movements of a CNC machine according to dynamic characteristics" consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The main purpose of the master's dissertation is to develop a system of recommendations for the choice of trajectories of the tool when processing surfaces of complex profile in order to reduce the auxiliary time and the total mileage of the equipment. Machine performance is greatly improved through the use of CAD / CAM systems to generate control programs (NC). Currently, many commercial CAD / CAM packages that provide automatic NC programming have been developed and applied to various cutting processes. Many cutting processes processed by CNC machines. In this paper, we try to find an effective solution approach to determine the best sequence of operations for many operations that are located in asymmetric locations and at different levels. The current state of the research issue is analyzed, the methods of forming the trajectories of the tool are considered, their advantages and disadvantages are considered, the method of developing control programs for machining complex surfaces by milling on a three-coordinate CNC machine is proposed, the method of developing measurement plans is proposed. cutting tool when machining complex parts in order to reduce the auxiliary time and trajectory of idling. The results of the work can be used in enterprises to increase the accuracy of machining of critical parts of complex profile.

Keywords: SURFACES OF COMPLEX PROFILE, MECHANICAL PROCESSING, INDEPENDENT MOVEMENT, MOVEMENT TRAJECTION, AUXILIARY TIME.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ХОЛОСТИХ РУХІВ ВЕРСТАТУ З ЧПК ЗА ДИНАМІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.....	15
1.1. Технічне забезпечення процесу фрезерування складних поверхонь деталей на трьохкоординатних верстатах з ЧПК.....	15
1.1.1. Загальні відомості про складні поверхні та деталі.....	15
1.1.2. Обладнання для формоутворення деталей складної форми.....	17
1.1.3. Інструментальне забезпечення трьохкоординатних верстатів з ЧПК при обробці деталей з складними поверхнями	19
1.1.4. Програмне забезпечення процесу обробки складних поверхонь на трьохкоординатних фрезерних верстатах з ЧПК.....	20
1.1.4.1. SIEMENS NX	21
1.1.4.2. AUTODESK POWERMILL.....	22
1.1.4.3. SOLIDCAM	22
1.1.4.4. CATIA.....	23
1.2. Технологічне забезпечення процесу обробки складних поверхонь деталей на трьохкоординатних фрезерних верстатах з ЧПК	25
1.2.1. Окремі стратегії обробки складних поверхонь	25
1.2.2. Загальна стратегія обробки складних поверхонь	31
1.2.2.1. Метод визначення мінімального холостого переміщення інструменту при його переході від однієї ділянки до іншої	32
1.2.2.2. Метод визначення найбільш ефективної послідовності обробки обраної ділянки заданими інструментами	33
ВИСНОВКИ.....	42
2. АЛГОРИТМ ОПТИМІЗАЦІЇ ХОЛОСТИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ІНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ТРЬОХКООРДИНАТНИХ ВЕРСТАТАХ З ЧПК	43
2.1. Постановка задачі.....	43
2.1.1. Математична модель мінімізації холостих переміщень при зміні ділянки обробки	49
2.1.2. Математичне моделювання послідовності обробки ділянок складної поверхневої форми	59
2.1.2.1. Алгоритми оптимізації послідовностей обробки ділянок	60
2.2. Алгоритм оптимізації холостих переміщень на верстатах з ЧПК за динамічними характеристиками	62
ВИСНОВКИ.....	66
3. ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРІЇ ТРАЄКТОРІЇ ХОЛОСТОГО РУХУ	67
ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРЕЗЕРНОЇ ОБРОБКИ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК.....	67
3.1. Динамічна характеристика	67
3.2. Умови появи похибки	72
3.2.1. Динамічна похибка верстату	72
3.3. Способи уникнути динамічних похибок.....	74

3.4. Аналіз попередньо побудованої простої траєкторії.....	76
3.5. Усунення недоліків попередньо побудованої простої траєкторії холостого руху інструменту на верстаті з ЧПК	78
ВИСНОВКИ.....	83
4. ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО ТРАЄКТОРІЙ ЗГІДНО ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ ТА РОЗРАХУНКІВ	84
4.1. Складові для ефективності впроваджених траєкторій у виробництво.....	84
4.2 Реалізація проекту виходу на ринок «Startup» проекту з продажу та підтримки програми автоматичної оптимізації траєкторії для фрезерних верстатів з ЧПК	87
4.3 Рекомендації по впровадженню технології оптимізації траєкторії холостого руху на фрезерних верстатах з ЧПК.....	90
ВИСНОВКИ.....	92
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	93
ЛІТЕРАТУРА	95

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЧПК - Числове програмне керування (англ. *Computer numerical control (CNC)*) — комп'ютеризована система керування, яка зчитує командні інструкції;

CAD – «computer aided design» / САПР - Система автоматизованого проектування;

CAM – «computer-aided manufacturing» - Система автоматизованого моделювання процесу обробки;

CAE – «computer-aided engineering» – Системи автоматизованого планування виробництва;

3D – «three dimensional» - трьохвимірна модель;

2D – «two dimensional» – пласка модель (креслення);

NC – «numerical control» -керуюча програма;

G – code- мова програмування програми NC;

ОС - операційна система (найвідоміші Windows/Linux/MACOS);

PDM – «product data management» – система керування даними;

PLM – «product lifecycle management» – система відслідковування життєвого циклу виробу;

ACVRP – «asymmetric capacitated vehicle routing problem» – проблема асиметричної ємності з маршрутизацією транспортного засобу;

ЛПБ – локальна площина безпеки;

ПБ – площина безпеки;

КГ – контрольована геометрія;

ALNS - «Adaptive Large Neighborhood Search» - Адаптивний пошук великого сусідства;

— - Побудована траєкторія руху інструмента



- Тіло заготовки

— - Пікова вершина

— - Площина безпеки

— - Контур заготовки



- точка початку-кінця



- проміжні точки траєкторії

ВСТУП

Сучасне виробництво характеризується як найбільш продуктивне та ефективне, та з кожним роком технології невпинно крокують уперед. Таким чином модернізація виробництва завжди була, є і буде нагальною потребою. В сфері виробництва товару однією з задач, що постають перед постачальником, зниження видатків, підвищення ефективності, скорочення як циклу випуску так і строків запуску виробів. Найбільш актуальним це є для машинобудівної промисловості, пов'язаної з виробництвом як великих партій так і деталей зі складною формою. Як правило для виготовлення подібних деталей необхідно детально вивірена технологія та створення комплексу верстаного обладнання необхідного для отримання необхідного результату та для отримання продукції високої якості. Все це займає значний час, що приводить до збільшення підготовчого періоду запуску виробництва.

Найбільш трудомістким буде виготовлення складних за формою та поверхнями деталей, що слугують як правило частинами автомобіля, літака, ракети, прес-форм, об'єктами мистецтва, тощо. В умовах серійного виробництва для їх виготовлення використовують фрезерні верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК).

Перевагами фрезерних верстатів з ЧПК є:

- 1) скорочення циклу виготовлення деталей;
- 2) зниження вимог до кваліфікації робітників;
- 3) гарантія повторення технологічного процесу;
- 4) зменшення об'єму браку та слюсарних робіт.

Найбільш поширеними на підприємстві є трьохкоординатні фрезерні верстати з ЧПК. Використання п'ятикоординатних та семикоординатних верстатів з ЧПК вважається не доцільним у зв'язку з високою ціною обладнання та труднощами, що виникають при підготовці виробництва виробу. Згідно технічної літератури при обробленні складних за формою деталей найдовшою, за часом, є чистова операція. Як відомо при чистовій обробці деталей рух інструментів включає в себе рух різання та холосте переміщення. При цьому сам процес різання виконується точковим торканням інструмента та деталі в процесі обробки.

Холостий рух верстату об'єднує в собі суму холостих переміщень верстату при зміні інструменту та при зміні області обробки. Час, який витрачено на холостий рух інструменту є допоміжним. При обробці начисто деталей, що мають складну форму, яким характерне велика кількість поверхонь більш простої форми та використання великої кількості різноманітних фрез, що зумовлено характеристиками певних поверхонь та найбільш ефективної їх обробки. Всі ці умови призводять до значного збільшення допоміжного часу, що витрачається на холості переміщення верстату. Скорочення

допоміжного часу при обробці деталей значно підвищує ефективність використання технологічного обладнання, особливо високою за вартістю багатоцільових верстатів.

Таким чином правильно обрана траєкторія холостого руху, визначення послідовності зміни інструментів та мінімальна кількість змін приводить до зменшення допоміжного часу, що в загальному підвищить ефективність оброблення і використання обладнання.

Вирішенню проблем з мінімізації часу різання вже були присвячені роботи В.М. Рєпина [2], [3], Ф.М. Медведєва [4], Б.Б. Пономарева [5], В.А. Данилова [6], вони змогли виділити необхідні параметри стратегій різання на кожній ділянці, раціонально розбити складну поверхню на окремі конструктивно-технологічні області, обрати фрези певних типорозмірів для обробки кожної окремої ділянки, виклали методи та алгоритми, що дозволяють оптимізувати процес та досягти зниження часу різання.

Проблему ж оптимізації допоміжного часу, що витрачається на холості переміщення при обробці складних поверхонь на трьохкоординатних верстатах з ЧПК, дослідники поки, що не приділяли належної уваги. Як показали проведені дослідження І. І. Кравченко [7], сучасні САМ системи не мають вбудованих засобів (модулів), що дозволяли б оптимізувати послідовність виконання переходів, обумовлену різноманітними формами окремих областей поверхні та необхідний для їх обробки інструмент.

В сучасному виробництві необхідний метод, який би дозволив автоматично й достатньо швидко обирати оптимальний варіант послідовності виконання переходів, відносно якої обрати і побудувати оптимальну траєкторію холостих переміщень, що також повинно бути узгоджена з часом зміни інструменту.

Вище сказане обумовлює **актуальність** подальшого виконання досліджень.

За результатами попередньо проведених досліджень [8], [9], при проектуванні траєкторії за правилами побудови кривої Без'є [10], можлива оптимізація траєкторії до 25%, що також в свій час зменшить і допоміжний час, не погіршуючи якість обробленої поверхні деталі. Наступні подальші дослідження є прямим продовженням вище наведених праць, з кінцевим результатом у вигляді кінцевої методології та алгоритму побудови оптимальної траєкторії.

Наукова новизна дослідження полягає в побудові оптимальної траєкторії переміщення інструменту на верстаті з ЧПК, як наслідок зменшення допоміжного часу витраченого на холості переміщення з урахуванням стійкості інструмента, мінімальної та достатньої висоти підйому інструмента, які гарантують виконання його холостих переміщень від ділянки до ділянки без зіткнення з заготовкою.

Матеріал для дослідження – деталі, що мають складну поверхневу форму, такі як моделі для оснастки ливарних форм, штампів та прес-форм, деталі машин і механізмів,

деталі приладів та товарів народного вжитку, деталі, що мають самостійну художню цінність, деталі з аеродинамічними та гідродинамічними поверхнями, оснастка для отримання деталей листовою штамповкою в автомобілебудуванні та літакобудуванні, поковки, що йдуть на виготовлення найбільших штамів та прес-форм та тому подібних.

Об'єкт дослідження – технологічні переходи при чистовій обробці, холості переміщення від обробленої поверхні до тієї, що ще не оброблена на трьохкоординтаних верстатах з ЧПК.

Предмет дослідження – вплив послідовності виконання переходів та довжини і виду траєкторії на допоміжний час, що витрачається на холосте переміщення верстату при зміні оброблюваної ділянки та при зміні інструменту.

Ціллю дослідження є підвищення продуктивності процесу чистового фрезерування при обробці деталей складної форми на трьохкоординтаних верстатах з ЧПК шляхом мінімізації допоміжного часу за рахунок побудови оптимальної траєкторії холостого руху та оптимальної послідовності виконання технологічних переходів.

У відповідності до цілі поставлені наступні задачі:

- 1) Визначення основних підходів у формуванні загальних та окремих стратегій обробки деталей з складними поверхнями на трьохкоординтаних верстатах з ЧПК, що виникли в сучасному машинобудуванні.
- 2) Пошук критерію оптимізації траєкторії холостого руху на верстатах з ЧПК.
- 3) Аналіз геометрії траєкторії, що була побудовано з урахуванням переходу між оброблюваними ділянками, зміни інструменту, обходу заготовки, оснастки та з встановленою зоною безпеки.
- 4) Розробка математичної моделі мінімізації холостих рухів при зміні оброблюваних ділянок та інструменту на основі точкового опису геометрії деталі.
- 5) Розробка алгоритму та методології побудови оптимальної траєкторії.
- 6) Практичне підтвердження ефективності запропонованих рішень.

Методи та методики

Аналіз та розв'язання поставлених задач вимагають застосування сучасних теоретичних, аналітичних та експериментальних досліджень, повинні містити в собі методи системно-структурного аналізу, методи математичної статистики. Теоретичні дослідження ґрунтуються на основних засадах технології машинобудування, знаннями з теорії обробки на верстатах з ЧПК, теорії динамічної стабільності системи верстату, теорії про обробку складних поверхонь на трьохкоординтаних фрезерних верстатах з ЧПК. Аналітичні дослідження були проведені в системах тривимірного інженерного моделювання, визначені попередні результати. За отриманими даними побудовано керуючу програму та визначили час на холосте переміщення новою траєкторією. Всі види

отриманих траєкторій було перевірено на динамічну стійкість в системі верстату, щоб забезпечити точній обробки та уникнути виникнення вібрацій. Проведено аналітичний розрахунок економічної доцільності введення даної технології у виробництво. Визначено алгоритм побудови найбільш оптимальної траєкторії. Отриманні дані є лише змодельованими ситуаціями, і ще не готові до повноцінного впровадження, потребують перевірки на широкому загалі верстатного обладнанні, бо показники за динамічною характеристикою є суцільно індивідуальними для кожного верстату.

Основні положення, що виносяться на захист:

- 1) Послідовність змін фрез, послідовність зміни оброблюємої ділянки з врахуванням періоду стійкості інструменту (фрез), висота підйому інструменту (фрез), що може гарантувати роботу без небажаного зіткнення з обладнанням.
- 2) Алгоритм мінімізації холостих переміщень при зміні оброблюємої ділянки з пошуком мінімальної висоти, що гарантує роботу без зіткнення з обладнанням.
- 3) Алгоритм оптимізації послідовності окремих ділянок враховуючи динамічну стійкість системи, мінімальну довжину траєкторії, мінімальний необхідний час, стійкість інструменту та мінімальну необхідну зону безпеки.
- 4) Побудова керуючої програми та проведення дослідження в САМ модулі на швидкість, зіткнення, довжину.
- 5) Результати перевірки та економічна доцільність проведених змін.

Теоретична значимість

Теоретичну значимість отриманих результатів в повному обсязі можливо оцінити лише з плином часу, але вже зараз можна сказати, що впровадження даних покращень, дозволить зекономити кошти підприємства, більш раціонально використовувати обладнання, уникнути небажаних поломок. Але впровадження даної системи потребує досвідчених кадрів, бо не кожний інженер зможе повністю передбачити зону обробки, та ввести необхідні параметри для побудови оптимальної траєкторії, тому на найближчі п'ять років доцільність даних досліджень під питанням. Дані дослідження можуть бути продовжені наступним поколінням магістрів та аспірантів до повного впровадження у виробництво, також можуть бути виокремлені як розділ в підручниках «Автоматизація технологічних процесів та виробництва», «Технології машинобудування» та інших споріднених напрямків.

Практична цінність

Практичну цінність даних досліджень можливо оцінити навіть перед впровадженням змін на виробництві. Найпростішим для сприйняття буде твердження: «Чим коротше і швидше, тим краще», але не слід забувати про динамічну стабільність оброблюючої системи. Все це врахувавши отримаємо ефективну модель змін у виробництві, за яких ми

не тільки не відчуємо погіршень у динамічній стабільності, а навпаки отримаємо можливість на більш короткій траєкторії підвищити максимальну швидкість приводу. Раніше швидкість була обмежена стійкістю системи та вимогами гальмівної системи приводів верстату, тепер з врахуванням нової геометрії траєкторії гальмування буде мінімальним, що зменшить знос приводів. Кожний верстат зможе відтворити написану програму обробки, оскільки зміни торкнуться лише керуючої програми без необхідності переналагодження верстату. Всі проведені дослідження відбувались в ліцензованому програмному забезпеченні, на базі: Компас (19), Siemens NX (12.0), SolidWorks (2019), Autodesk Inventor (2018).

1. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ХОЛОСТИХ РУХІВ ВЕРСТАТУ З ЧПК ЗА ДИНАМІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

1.1. Технічне забезпечення процесу фрезерування складних поверхонь деталей на трьохкоординатних верстатах з ЧПК.

1.1.1. Загальні відомості про складні поверхні та деталі

В машинобудуванні, до теперішнього часу, намагалися використовувати максимально прості за формою та геометрією деталі, це було обумовлено можливостями верстатного обладнання та складністю проектування і обчислення більш нестандартних деталей. Зі збільшенням попиту на літаки та кораблі з'явилась проблема виготовлення великої кількості точних та складних за формою деталей. Як відомо, проблему вирішили копірами та шаблонами, але копії та шаблони доцільно використовувати в малосерійному та одиничному виробництві. Для деталей великої серійності постало питання обробки складних поверхонь. На верстатах з ручним керуванням досягти точного повторення серій неможливо, тому було побудовано верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) таким чином вирішили проблеми з повторенням серій.

Для більшої ефективності та прогнозованості обробки створили CAM/CAE/CAD програми, що дозволили моделювати складну деталь, та писати керуючу програму для верстату з ЧПК, запускати максимально продумане виробництво (рис.1.1).

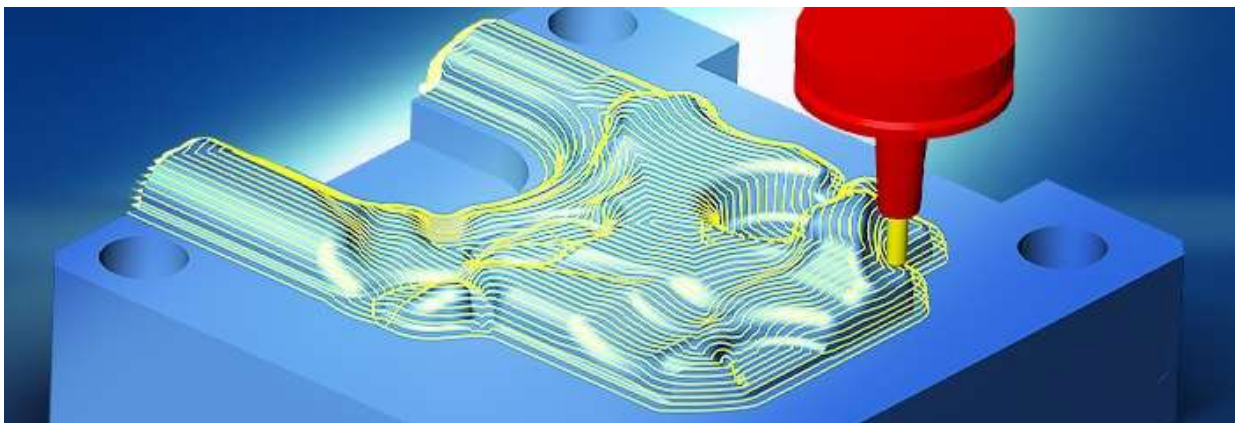


Рисунок 1.1. Приклад змодельованої ділянки оброблення складної деталі в САМ модулі [12].

В техніці найбільш поширені три види поверхонь:

- Алгебраїчні – це поверхні, що підпорядковані математичним рівнянням, певної форми та з певним положенням в просторі;
- Поверхні з числовими мітками – поверхні форма яких визначена окремими точками, а координати цих точок задані в вигляді таблиць;
- Конструктивні – поверхні форма яких визначається конструктивними особливостями [13].

Складні за формою поверхні, як правило можуть поєднувати в собі всі три пункти. А для їх виготовлення простіше використати ЧПК верстати з керуючою програмою, яка вже може будуватись як за математичною залежністю і рівняннями, так і за масивом точок, ніж виготовляти в ручну за шаблонами.

В технічній літературі вдало виклали визначення складної форми, а саме: «поверхность, в дифференциальной окрестности каждой точки которой главные кривизны от одной ее точки к другой бесконечно близкой точке изменяются либо по величине, либо по ориентации главных секущих плоскостей, либо по величине и ориентации главных секущих плоскостей одновременно» [14, с. 192] (рис.1.2).



Рисунок 1.2. Приклади складних поверхонь

Технічна література в свою чергу поділяє деталі зі складними поверхнями за їх застосуванням в науці, техніці та технології на три класи: інструменти, деталі виробів, заготовки деталей.

Клас інструментів поділяють на три підкласи: штампи, прес-форми та моделі.

Клас деталей прийнято поділяти на: деталі механізмів і машин, деталі приладів та товарів господарчого спрямування, деталі, що мають художню цінність.

Клас заготовок складає продукція, що є результатом попередньо виконаних операцій (поковки, відрізи, листовий штамп, тощо.).

Використовуючи дані заготовки, виконується обробка на ЧПК верстатах для отримання деталей зі складними поверхнями і високою точністю. ЧПК верстати здатні виконувати складні рухи робочих органів з застосуванням відповідних ріжучих інструментів та певних методів обробки, але потребують керуючої програми, що містить в собі швидкість переміщення і різання в кожній точці маршруту та додаткові параметри навігації. Створення керуючого коду може відбуватись як вручну оператором (для легких деталей), так і автоматично CAD програмою, але зазвичай автоматично створену програму допрацьовує програміст-оператор, оскільки не всі ділянки можливо розглянути в автоматичному режимі.

1.1.2. Обладнання для формоутворення деталей складної форми

Формоутворення деталі відбувається шляхом заглиблення ріжучого інструменту в поверхню заготовки та видалення встановленого припуску в процесі утворюється стружка, а результатом є готова деталь.

Для формоутворення поверхонь складної форми, найбільш поширені у використанні фрезерні верстати з ЧПК.

Ключовими перевагами даного типу верстатів є:

- По перше, повне забезпечення повторення технологічного процесу;
- По друге, сучасні програми моделювання та автоматизації виробництва дозволяють максимально швидко й просто писати керуючу програму, що зменшить час обробки та терміни запуску виробництва;
- По третє, можливість приводів верстату відтворити потрібні рухи робочих органів з заданою точністю за розрахований час за попередньо заданими командами;
- По четверте, використання верстатів з ЧПК дає виробництву перевагу у вигляді швидкого переорієнтування виробництва та переналагодження для випуску нової продукції;
- По п'яте, обробка не потребує втручання оператора у сам процес, а лише певний контроль за оснащенням.

Доцільним та ефективним використанням верстату з ЧПК є коли:

- кількість верстатів, що він може замінити лежить в межах від 2 до 8 одиниць;
- можливо скоротити кількість працівників мінімум на 20-30%;
- можливе зниження трудомісткості виготовлення деталей на 25-80%;
- скорочення строків на підготовку та налагодження виробництва на 50-70%;
- збільшення частки машинного часу у структурі операції та ростом продуктивності праці до 75%;
- скорочення загального часу циклу виготовлення продукції на 50-60%;
- зменшення вартості проектування та виготовлення оснащення від 30 до 80%;
- зменшення кількості браку, підвищення точності обробки в 2-3 рази, забезпеченням взаємозамінності деталей;
- зменшення об'єму та необхідного часу на виконання розмітки та слюсарних робіт в 4-8 разів.

У сучасності верстати з ЧПК показали себе максимально ефективними при обробці складних деталей та поверхонь, при серійному виробництві. Кожне виробництво ставить на меті, в майбутньому, повний перехід на верстати з ЧПК. Але верстати мають високу вартість та заплановану програму обслуговування, що також не є з дешевих, тому постає

питання максимальної оптимізації виробництва з мінімальним часом простою, обробки, допоміжного часу. У зв'язку з умовами ринкової економіки України, великого поширення здобули, більш дешеві, верстати з ЧПК, що мають три координати керування, хоча використання п'яти-координатних верстатів є більш доцільним.

Найпопулярнішим є поєднання трьохкоординатного верстату з ЧПК з середньою точністю та поворотного столу (як з однією керованою віссю, так і з двома), таким чином отримаємо п'ятикоординатний верстат за найменшу ціну, дешевий в обслуговуванні малий за габаритами, але менш точний. Яскравим прикладом такого поєднання є використання продукції компанії HAAS, доступна ціна та середня точність верстатів робить їх конкурентами до високовартісних п'ятикоординатних верстатів, хоча в компанії існують і власні п'ятикоординатні верстати, вони в ціні будуть все одно дорожче за зв'язку: поворотний стіл + трьохкоординатний ЧПК.



Рис. 1.3. Повортний стіл та трьохкоординатний верстат компанії «HAAS»

Простота програмування системи FANUC/HAAS дозволяю швидко і ефективно навчати операторів для забезпечення ефективного виробництва, а широка номенклатура обладнання, що поєднуються між собою, дозволяє будувати ефективні дільниці високо гнучкого виробництва. Таким чином поворотний стіл може працювати з усією продукцією фірми та може підпорядковуватись загальному керуючому коду без додаткових змін. За потреби стіл можна замінити без зміни коду (окрім габаритних маркерів) і продовжити випуск деталей.

Все це, і багато інших позитивних пунктів, дозволило компанії зайняти лідируючі позиції на ринку ЧПК верстатів, зокрема в Україні представлений офіс та демонстраційна дільниця компанії, продукція має великий попит та позитивні відгуки покупців.

1.1.3. Інструментальне забезпечення трьохкоординатних верстатів з ЧПК при обробці деталей з складними поверхнями

Обробка на трьохкоординатних верстатах з ЧПК характеризується як правило великою кількістю використовуваного інструменту різних видів: кінцеві фрези, сферичні, конусні сферичні, сферо-циліндричні та інші спеціальної форми інструменти.

Найбільш часто використовують циліндричні, конічні та сферо-циліндричні фрези, завдяки їх універсальності та широкою номенклатурою (рис. 1.4).

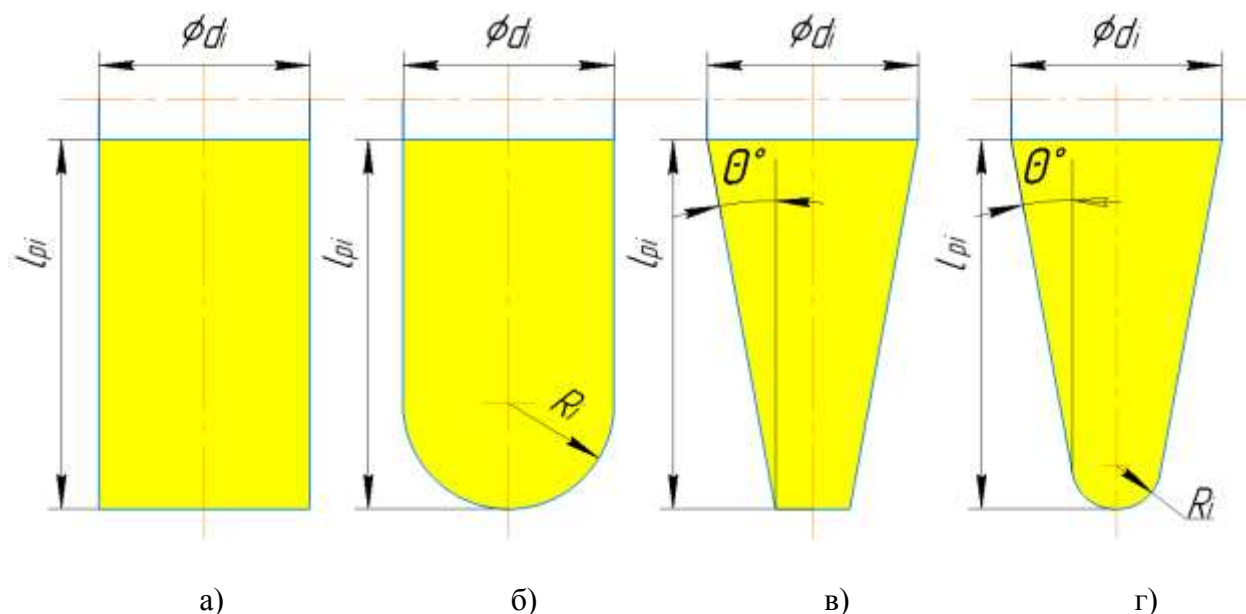


Рисунок 1.4. Різальні інструменти для обробки складних поверхонь деталей на трьохкоординатних фрезерних верстатах з ЧПК: циліндрична (а), сферо-циліндрична (б), конічна (в), сферо-конічна (г).

Процес формоутворення складних за формою поверхонь на трьохкоординатних верстатах з ЧПК відбувається в багатоінструментальному режимі, а отже потребує частой заміни робочого інструменту, в більшості випадків зміна відбувається автоматично з певною періодичністю відповідно стійкості та відповідно операції. В верстатах з ЧПК автоматична зміна інструменту відбувається за рахунок розміщення їх в інструментальному магазині, револьверних головках та з застосуванням як внутрішніх так і зовнішніх автоматичних механізмів заміни інструменту.

Для проведення автоматичної зміни інструментів потрібно загрузити інструментальний магазин та задати індекси згідно керуючої програми для відповідних інструментів, в процесі зміни інструмент автоматично переміщається в позицію заміни, для кожного верстату визначається окремо або виробником або при написанні керуючої програми, завдяки введеній стандартизованої інструментальної оправки використовується відповідні спільні основні бази для встановлення оправок в шпиндель або револьверну

головку верстату, а також уніфіковані виконавчі поверхні для закріплення ріжучого інструменту та його доставку в початкову точку робочої ділянки. При закінченні формоутворення поверхні деталі, інструментальний магазин приходить в початкове положення та встановлюється інструмент для першої операції, автоматично або в ручну змінюється заготовка і цикл знову повторюється.

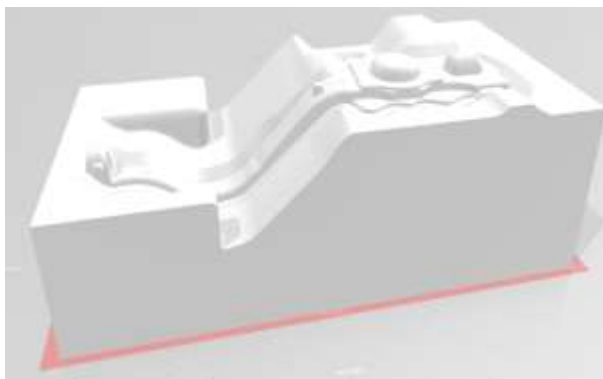
Автоматизована заміна інструментів дозволяє забезпечувати стабільне, точне положення інструмента та мінімізувати необхідний час на їх заміну.

1.1.4. Програмне забезпечення процесу обробки складних поверхонь на трьохкоординатних фрезерних верстатах з ЧПК

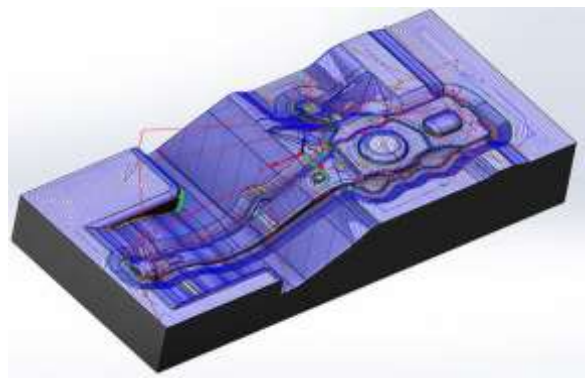
Сучасні різноманітні комплекси програмного забезпечення, дають можливість спеціалістам повністю автоматизувати процес конструкторської та технологічної підготовки виробництва деталей будь-якої геометричної складності.

Цикл створення виробу прийнято поділяти на три етапи:

- По-перше, необхідно розробити дизайн та 3D моделі з допомогою CAD систем;
- По-друге, використовуючи модуль САМ -програми згенерувати керуючу програму для верстатів з ЧПК;
- По-третє, провести імітаційне моделювання процесу виготовлення, з усуненням можливих недоліків.



1.5. Створена 3D модель деталі в CAD програмі



1.6. Отримана траєкторія обробки в САМ модулі



1.7. Готова деталь як результат роботи керуючою програми

До числа систем автоматизованого виробництва відносять наступні програмні продукти: ADEM, Alphacam, ArtCAM, BobCAD-CAM, CAM-TOOL, CAMWorks, CATIA, CimatronE, Creo, DCAMCUT, Edgcam, ESPRIT, FeatureCAM, Gemma 3D, GibbsCAM, GO2cam, HSMWorks, hyperMILL, Mastercam, NCG CAM, PartMaker, PEPS, PowerMILL, SharpCam, SolidCAM, SprutCAM, SurfCAM, T-FLEX, Tebis, Tehtran, TopSolid, VISI, VisualMILL, WorkNC, ZW3D, КОМПАС ЧПК, PowerMill, Mastercam, SprutCAM, SolidCam, Artcam, EdgeCam, Vericut, FeatureCAM, Siemens NX, Autodesk Inventor та інші.

Розглянемо найбільш популярні середовища написання керуючого коду.

1.1.4.1. SIEMENS NX

NX це CAD/CAM/CAE-система САПР (система автоматичного проектування) виробництва компанії Siemens PLM Software. Програма використовує ядро геометричного моделювання Parasolid. NX підтримує широкий спектр операційних систем, включаючи UNIX, Linux, Mac OS X, Windows з можливістю одночасного використання декількох ОС. NX CAM — модуль підготовки керуючих програм для верстатів з ЧПК, підтримує різні види обробки: токарну, фрезерну на 3-5-осьових верстатах з ЧПК, токарно-фрезерну, електроерозійну дротяну обробку. Система NX CAM підтримує прогресивні види обробки і устаткування: високошвидкісне фрезерування, обробку на основі елементів, токарно-фрезерні багатофункціональні верстати. Містить вбудований модуль симуляції обробки на верстаті, що працює в кодах керуючої програми (G-code), який використовується для аналізу керуючих програм і забезпечує контроль зіткнень. Має асоціативний зв'язок між вихідною моделлю і сформованою траєкторією інструменту забезпечує автоматичне оновлення даних при внесенні змін. Програма широко використовується в машинобудуванні, здобула популярності в компаніях, що випускають вироби з високою щільністю компоновки та великою кількістю деталей складної форми [16].

Засоби промислового дизайну в NX призначені для моделювання поверхонь вільної форми, візуалізації, розв'язання задач зворотного інжинірингу, інтеграції з конструкторськими САПР (CAD), засобами інженерного аналізу (CAE) та технологічними САПР (CAM). Програма NX CAM має тісно інтегровану систему постпроцесування, що дозволяє, певною мірою, спростити генерування необхідного коду верстату з ЧПК для більшості типів верстатів та систем ЧПК. Багаторівневий вбудований процес перевірки програми для верстатів з ЧПК включає симуляцію на основі G-cod, що дозволяє виключити необхідність використання зовнішніх пакетів програм для симуляції. Інтеграція NX CAM з системою управління даними і процесами Teamcenter є основою розширеного рішення для виробництва деталей. Це дозволяє легко управляти всіма

типами даних, включаючи 3D-моделі деталей, карти наладки, переліки інструментів, а також файлами керуючих програм для верстатів з ЧПК, забезпечуючи повний контроль ревізій. Таке управління даними і процесами гарантує використання потрібних даних, в тому числі оснащення і програм для верстатів з ЧПК, що забезпечує скорочення витрат і часу виготовлення деталей. Останні технології автоматизації програмування верстатів з ЧПК в NX CAM дозволяють підвищити ефективність виробництва. Завдяки обробці на основі елементів можна скоротити час програмування до 90%. Крім того, шаблони дозволяють використовувати заздалегідь певні процеси на основі правил і тим самим стандартизувати програмовані завдання з метою прискорення їх виконання [17].

1.1.4.2. AUTODESK POWERMILL

Autodesk PowerMILL – це програмний продукт САПР компанії Autodesk Inc. (США). Система призначена для програмування складних видів фрезерної обробки на багатовісьових верстатах з ЧПК. Містить високоефективні стратегії обробки, що дозволяють значно скоротити час обробки на верстаті та підвищити якість оброблених поверхонь. Програма має велику кількість модулів і можливостей від програмування 2D обробки до 3D, як на трьохосьових верстатах, так і на п'ятиосьових, має власні підпрограми оптимізації припуску, траєкторії, що дозволяє значно скоротити час обробки. Дозволяє виконувати моделювання на малопотужних комп'ютерах, має тісну інтеграцію з CAD/CAE програмами, дозволяє редагувати та створювати 3D/2D моделі [18]. Все із переліченого робить її також привабливою для певного сегменту покупців, при цьому щорічні напрацювання та оновлення роблять програмний продукт Autodesk PowerMILL достойним конкурентом на ринку.

1.1.4.3. SOLIDCAM

SolidCAM – це інструмент швидкого та легкого створення керуючих програм для токарних, фрезерних та електроерозійних верстатів з ЧПК. Використання SolidCAM як інтегрованого додатку до програмних продуктів, що входять до складу Autodesk Inventor Series/Professional, що надає можливість створення повнофункціональної CAD/CAM – системи. Програма підтримує всі методи обробки отворів, двух-, трьох- та чотирьохосьову фрезерну обробку, п'ятиосьову позиційну і неперервну фрезерну обробку, високошвидкісну фрезерну обробку, токарну та токарно-фрезерну обробку, електроерозійну обробку. Завдяки інтеграції SolidCAM та Autodesk Inventor всі операції обробки визначаються, розраховуються та перевіряються безпосередньо у середовищі Autodesk Inventor. Використовувані при обробці двовимірні та тривимірні геометричні дані підтримують повноцінний асоціативний зв'язок з конструкторським проектом

Autodesk Inventor. При внесенні змін геометричних параметрів в проект у Autodesk Inventor програма SolidCAM дозволяє автоматично перевизначити всі операції обробки згідно до змінених параметрів. Однією з відмінних особливостей SolidCAM – орієнтація на підтримку інтелектуальних процесів обробки. Програма надає користувачу можливість створювати та складати шаблони обробки для їх багаторазового використання при обробці аналогічних деталей. Завдяки зручному використанню та великій різноманітності підтримуваних операцій обробки SolidCAM найкращим чином підходить для вирішення механообробних задач як в невеликих або середніх цехах одиничного виробництва, так і на великих промислових підприємствах, що виробляють деталі та вузли в масовому та крупносерійному об'ємі [19].

Завдяки широкому набору функцій та модулів, SolidCAM є універсальним інструментом для будь-якого виробництва: електротехнічної, електронної, автомобільної, машинобудівної, аерокосмічної, тощо. Таке різноманіття обумовлено як можливостями самої програми SolidCAM, так і її інтегруванню з Autodesk Inventor, який є основним середовищем просторового моделювання, застосовуваним майже у всіх галузях.

1.1.4.4. CATIA

CATIA - (*Computer Aided Three Dimensional Interactive Application*) САПР французької фірми Dassault Systèmes- одна з найвідоміших універсальних CAD/CAM/CAE/PDM-систем. Заслужене місце в лідируючій групі на світовому ринку досягнуто нею завдяки реалізації всебічного комплексного інтегрованого підходу, що дозволив в одній системі успішно здійснювати весь цикл створення нового виробу: від розробки концептуальних моделей до підготовки керуючих програм для верстатів з ЧПК і випуску необхідних креслень і конструкторсько-технологічної документації [20].

В 1980-х за її допомогою було створено військовий літак фірми Dassault Aviation. Пізніше програму адаптували для аерокосмічної, автомобільної, суднобудівної та інших галузей. CATIA використовували для проектування музею Гугенхайма в Більбао і Уолт Дісней Концерт Холл у Лос-Анжелесі. Найновішою версією на 2019 рік є V5 з новими модифікаціями. Вперше у даній версії в ранніх її редакціях заснували систему PLM (Product Lifecycle Management), що визначило рух всієї індустрії САПР на роки вперед [21].

Найбільш відомі проекти, що були реалізовані в програмі CATIA: корпорація Boeing— проектування літаків; проектування Airbus A380 (найбільшого пасажирського літаку); проектування літаку Sukhoi Superjet 100; проектування АПЧ (атомний підводний човен) «Вірджинія»; термоядерный реактор - ITER [22].

1.2. Технологічне забезпечення процесу обробки складних поверхонь деталей на трьохкоординатних фрезерних верстатах з ЧПК

Для отримання результатів експерименту розглядаємо процес отримання складних поверхонь деталі за допомогою фрези одного типорозміру, що забезпечує повне видалення припуску, включаючи поверхні, що описуються малими радіусами. Формоутворення такої поверхні пов'язаний з великими витратами машинного часу. Сучасне металорізальне обладнання дозволяє використовувати при обробці кілька інструментів, що робить можливим при чистовому фрезеруванні основну частину припуску знімати інструментом, що забезпечує підвищену продуктивність, а для видалення недоопрацьованих областей використовувати кінцевий інструмент з малими розмірами утворює його ріжучої частини, що дозволяє істотно зменшити час формоутворення.

При цьому до основних завдань, пов'язаних з фрезеруванням складних поверхонь деталей, відноситься:

- поділ поверхні на окремі конструктивно-технологічні ділянки;
- вибір фрез з найбільш придатною формою і розмірами для обробки кожної ділянки;
- визначення стратегій різання на кожній ділянці.

Послідовність обробки ділянок - це загальна стратегія.

Розподіл на області і вибір фрез для обробки за певною стратегією забезпечує підвищення продуктивності обробки деталі при досягненні необхідної якості поверхні. Слід мати на увазі, що послідовність обробки виділених ділянок може вплинути на довжину холостих переміщень інструменту і число змін фрез з урахуванням їх стійкості. Саму стратегію, яка застосовується для обробки кожної ділянки, називають приватної, яка встановлює в рамках технологічного переходу траєкторію руху інструменту при обробці однієї з областей [23], [24], [25].

1.2.1. Окремі стратегії обробки складних поверхонь

В сучасних САМ системах крок поділу поверхні, вибір форми і розмірів інструменту, введення параметрів стратегії обробки здійснюється не автоматизовано, а вручну. Особливо не простий для технологів виявляється задача визначення кордону між зонами поверхні, яка не має явно вираженого контуру. Саме цей факт викликає зростаючий інтерес дослідників до пошуку оптимального розподілу поверхні, визначення форм і розмірів інструменту, вибору параметрів стратегії обробки. Вибору приватної стратегії присвячені дослідження, виконані в університетах і наукових лабораторіях

Австрії, Німеччини, Великобританії, США, України, [149], [101], [119], [112], [113], [129], [67], [137], [32], [65], [66], [20], [43], [44].

Рекомендації щодо практичної реалізації метод оптимізації багато інструментальної обробки складних поверхонь дані в роботах С.П. Радзевича [65], [66], В.М. Рєпіна [67], Ф.В. Медведєва [44]. Базові положення теорії формування траєкторії інструменту при обробці складної поверхні представлені в працях С.П. Радзевича. В роботі [65, с. 431-512] як аспекти формоутворення поверхонь деталей він виділяє локальне, регіональне і глобальне формоутворення і викладає теорію синтезу розділених формоутворень. Під локальним формоутворенням розуміється процес різання поверхні деталі в околиці поточної її точки.

Автор виділяє два фактори, що впливають на рішення задачі синтезу локального формоутворення: параметри поверхні деталі і вихідної інструментальної поверхні в диференціальній околиці точки їх дотику, і відносна локальна орієнтація цих поверхонь.

Локальне формоутворення - це, по суті, скалярний добуток значень подач інструменту уздовж і поперек рядка формоутворення, розраховане в межах точки дотику поверхні деталі і вихідної інструментальної поверхні. Найвигідніші його параметри повинні забезпечити досягнення максимуму локальної продуктивності формоутворення. При регіональному формоутворенні розглядається процес утворення поверхні деталі в межах одного рядка на ній. Сутністю рішення задачі синтезу регіонального формоутворення є розрахунок параметрів найвигіднішою траєкторії, при русі інструмента уздовж якої поточне значення ширини рядка формоутворення максимально, а формоутворення при цьому площа рядка на поверхні деталі при інших однакових умовах найбільша.

Глобальне формоутворення передбачає врахування часткової інтерференції сусідніх рядків формоутворення і «крайовий ефект» - облік впливу на параметри процесу формоутворення форми і параметрів меж контуру, що обмежує оброблювану поверхню деталі.

Завданням синтезу глобального формоутворення є:

- відбір таких ліній з сімейства, отриманих в результаті рішення задачі синтезу регіонального формоутворення, які в якості траєкторій формоутворення забезпечують досягнення максимуму глобальної ефективності;
- встановлення області, в якій проявляється вплив «крайового ефекту» для того, щоб визначити найвигідніші траєкторії врізання інструменту в заготовку і виведення його з контакту з обробленою деталлю («траєкторій врізання-висновків»);
- визначення координат найвигіднішої точки початку обробки деталі (рис. 1.7).

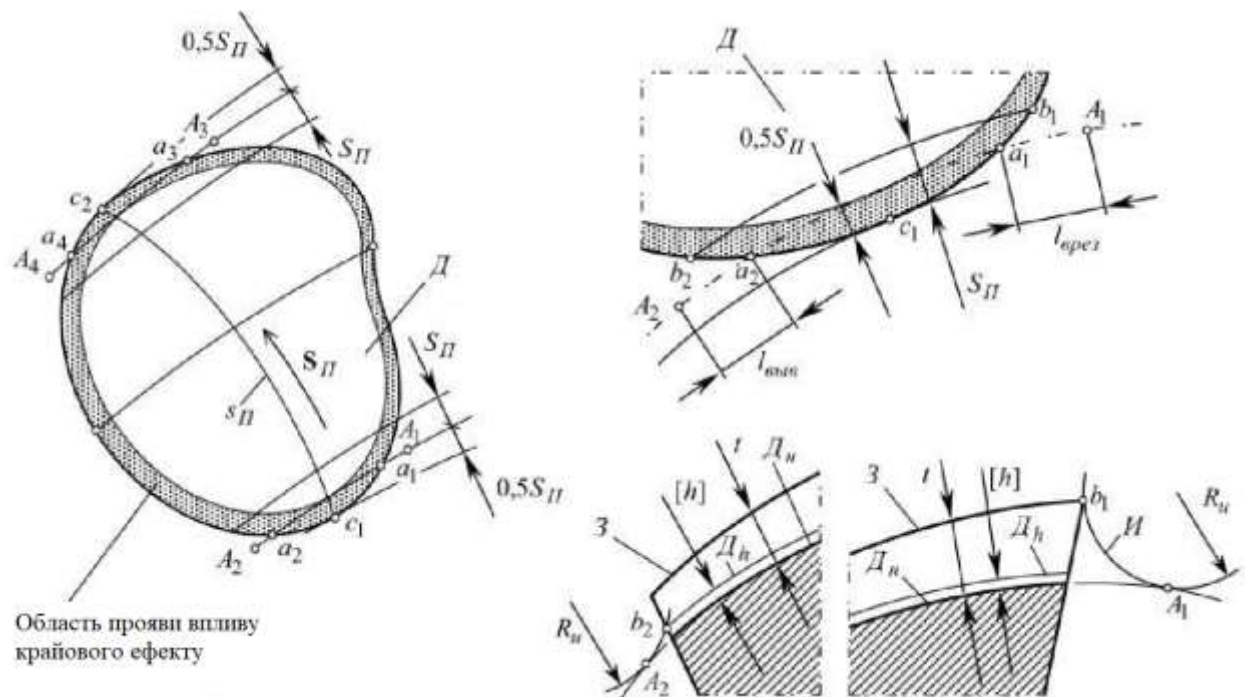


Рис. 1.7. Визначення положення точки початку обробки складної поверхні деталі на багатокординатному верстаті з ЧПК [65, с. 502]

У зазначених роботах представлені теоретичні основи зонування поверхні на окремі області за результатами рішення задачі синтезу глобального формоутворення, вибору найкращого інструменту за критерієм ефективності його використання для формоутворення заданої поверхні. У роботах [50], [59], [60], [61], [67] представлені результати досліджень і практичного застосування розробленої теорії оптимізації стратегії формоутворення складних поверхонь (оптимальні траєкторії руху фрези) на трьохкоординатних фрезерних верстатах з ЧПК. Авторами обґрунтовано обрані критерії оптимізації стратегій, розроблений метод вибору стратегій і їх параметрів, що включає два основних етапи.

Перший - визначення оптимальних параметрів для кожної зі стратегій (розглянуто 5 стратегій: колова, радіальна, спіральна, растрова, стрічкова спіраль).

Другий - порівняння максимальних значень середніх критеріїв оптимальності, отриманих для кожної зі стратегій.

За результатами аналізу для обробки деталі рекомендується та стратегія, у якій цей критерій максимальний. За розробленою методикою для обробки деталі вибирається стратегія і її параметри таким чином, щоб задається напрямку руху інструменту якомога менше відхилялася від теоретично оптимального напрямку, встановленого з умови досягнення максимуму локальної продуктивності формоутворення. При цьому одиничний вектор, напрям якого в заданих координатах збігається з оптимальним напрямком формоутворення, визначає теоретично оптимальний напрямку руху інструменту в деякій

точці деталі. За запропонованим алгоритмом розроблений програмний модуль оптимізації стратегії обробки для вибору типу і параметрів стратегії чистової фрезерної обробки, який дозволяє в кінцевому підсумку розрахувати наступні параметри:

- максимально досягне значення критерію; - оптимальний кут растра;
- середній критерій для растрової стратегії при оптимальному куті растра;
- оптимальні координати центра спіральної стратегії;
- середній критерій для спіральної стратегії при оптимальних координатах центру;
- середній критерій для стратегії обробки за рівнями осі Z.

На підставі розрахунків програма формує висновок, що містить найменування обраної стратегії і її параметри. Завдання поділу поверхні на ділянки і підбору інструментів для формоутворення цих областей знайшли рішення в роботах [19], [44], [50], [52]. У них представлені методи оптимізації числа і складу технологічних переходів з визначенням меж обробки і вибору типорозмірів інструментів для обробки скульптурних поверхонь кінцевими і сферо-циліндричними фрезами на трьохкоординатних верстатах з ЧПК. Суть методу розподілу поверхні, запропонованого авторами, полягає в перевірці того чи іншого інструменту на здатність відфрезерувати задану скульптурну поверхню, на підставі чого прораховуються області технологічних переходів для обраного типорозміру інструменту.

У процесі рішення представляється можливим:

- визначити розміри і поєднання кінцевих і сферо-циліндричних фрез для обробки конкретної деталі на основі оцінки локального та глобального фрезерування;
- перевірити параметричним методом моделі на фрезерування за дискретним даними, представленим рівномірним масивом точок або двовимірним півтоновим растровим зображенням;
- знайти для інструментів заданої форми і розмірів кластерним методом оптимальні межі областей обробки, описувані контурними кривими, за дискретно заданої моделі деталі (рис. 1.8). кластерний метод побудований на методиці аналізу тривимірної точкової моделі або двовимірного півтонового растрового зображення.

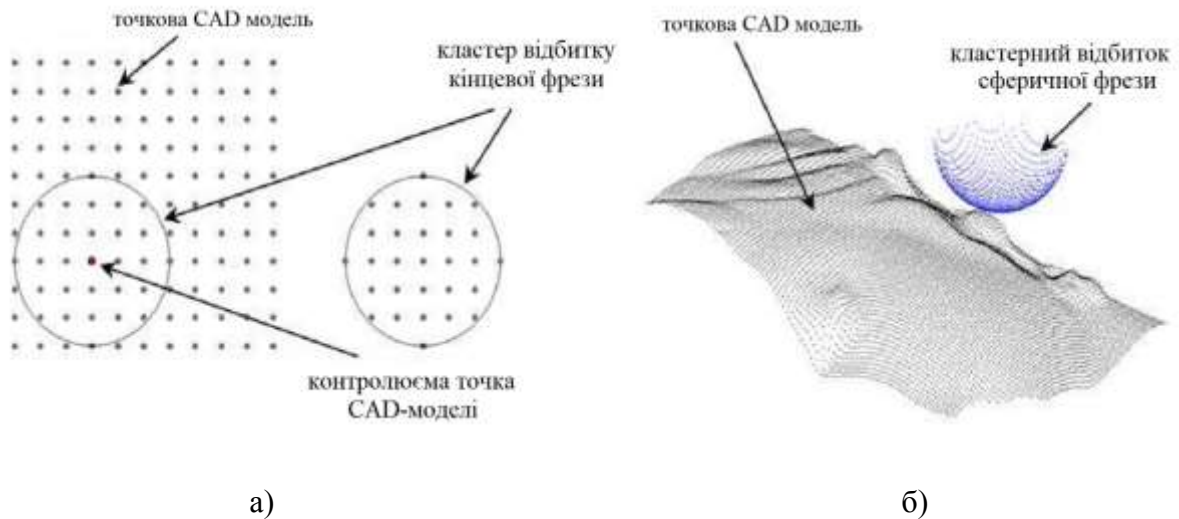


Рис.1.8. а) генерація кластера відбитка кінцевої фрези; б) перевірка криволінійних ділянок точкової CAD-моделі [52].

- побудувати кубічні сплайни при апроксимації будь-якої кількості точок замкнутої кривої (рис. 1.9).

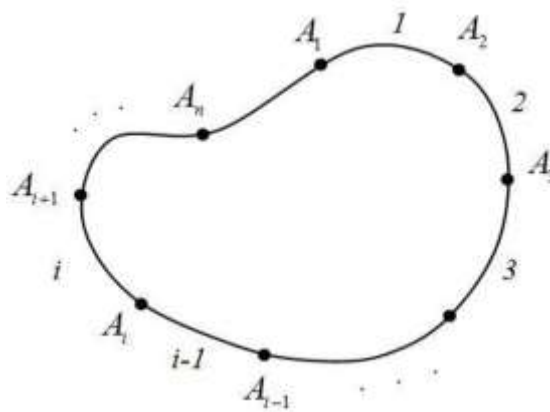


Рис.1.9. Замкнута крива, що проходить через задані точки [52].

На основі створеного математичного апарату розроблений програмний модуль оптимізації меж обробки деталей (OptiMILL), працездатність якого підтверджена експериментальною частиною. При проведенні дослідження автори використовували відомі підходи вирішення проблем приватних стратегій для побудови алгоритму оптимізації процесу формоутворення на основі оцінки локального та глобального критерію фрезерування і встановлення меж оброблюваних областей обраними інструментами.

Задача зонування складних поверхонь розглянута в роботі [137], в якій представлені стратегія та алгоритми розбиття складних поверхонь на окремі конструктивно-технологічні ділянки для численних операцій, включаючи чорнову і чистову обробку. Сутність поділу полягає в тому, що для кожної операції вибір форми і

параметрів фрези ґрунтується на мінімізації часу обробки, а саме розподіл визначає геометрія фрези і поверхні. При чистовій обробці кінцеві фрези більшого діаметра можуть бути використані для різання більшості ділянок поверхні, що забезпечує високу продуктивність, а з меншими розмірами дозволяє фрезерувати недопрацьовані ділянки. Поверхневий поділ за інструментами включає в себе поверхневе розкладання за кривизною і контурне розкладання за радіусом інструменту. Пропонується і поверхневе поділ за шаблоном траєкторії руху інструменту ухилами. Поділ поверхні в багатьох випадках забезпечується комплексним застосуванням декількох або всіх способів розкладів. У роботі автори особливу увагу приділяють алгоритму поверхневого розкладання в залежності від кривизни.

Основними етапами в цьому випадку є:

- зміщення нижньої поверхні на відстань, рівну радіусу більшої сферо-циліндричної фрези (рис.1.6);
- визначення всіляких перетинів кривих ліній на виносній поверхні (рис.1.6b);
- визначення всіляких перетинів кривих ліній на виносній поверхні для того, щоб знайти вторинні ділянки (рис.1.6с);
- виключення вторинних ділянок і отримання в подальшому первинних областей (рис.1.6d).

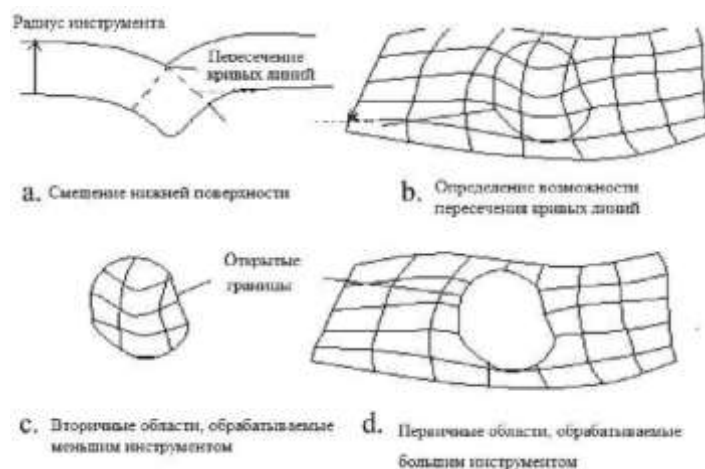


Рис.1.6. Алгоритм розбиття поверхні діаметром фрези [137].

Алгоритм поверхневого розбиття ухилами передбачає знаходження 3-похилих кривих окремого шматка поверхні. Ізо-похилі криві визначаються на підставі ухилу в кожній точці на поверхні (рис. 1.7).

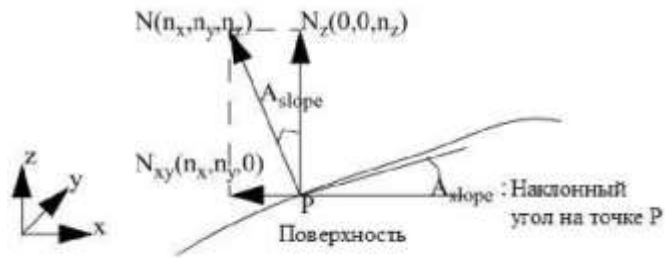


Рис.1.7. Вектор нормалі в точці на поверхні [137].

Таким чином, в підготовці виробництва деталей зі складними поверхнями на трьохкоординатних верстатах з ЧПК такі проблеми, як вибір кількості інструментів, їх форми і розмірів; поділу поверхні на окремі конструктивно-технологічні зони; проблема визначення траєкторій врізання-висновків і визначення точки початку обробки на кожній ділянці; виявлення приватної стратегії формоутворення, прийнятої для кожної ділянки може вважатися теоретично і практично вирішеними із застосуванням досить відомих алгоритмів оптимізації. Результати, отримані при вирішенні цих завдань, є основою для проведення подальших досліджень в напрямку оптимізації послідовності обробки виділених ділянок. Дуже актуальним стає пошук рішень по оптимізації холостих переміщень інструменту при переході від однієї ділянки до іншої і при зміні інструментів, що значною мірою впливає на допоміжний час роботи верстата і дозволяє визначити загальну стратегію обробки.

1.2.2. Загальна стратегія обробки складних поверхонь

Як було представлено вище, в результаті оптимізації приватних стратегій визначають оброблювані ділянки, їх межі, інструмент та геометрію його траєкторії при обробці, і як наслідок координати точки початку обробки, траєкторії врізання і висновків. Слід зазначити, що для різних послідовностей переходу від однієї до іншої виділеної ділянки довжини холостих переміщень інструменту значно різняться. Крім того, що гарантується час роботи кожного інструменту обмежена його періодом стійкості, що призводить до додаткового збільшення довжини холостих переміщень через необхідність зміни інструментів з метою забезпечення вимог до якості поверхні. Багаторазова зміна інструменту при обробці розділеної на ділянки поверхні збільшує довжину холостих переміщень. У зв'язку з цим, для зменшення часу на зміну інструментів необхідно число використовуваних фрез для формоутворення областей складних поверхонь звести до мінімуму при максимальному використанні їх ресурсу. Таким чином, завдання оптимізації загальної стратегії обробки є пошук найвигіднішої послідовності, за якою холості рухи, що витрачаються на перехід інструменту від ділянки до ділянки, і на зміну інструменту,

призвело б до мінімуму витрат часу, з урахуванням мінімального холостого переходу інструменту від однієї ділянки до іншої, без зміни інструменту.

1.2.2.1. Метод визначення мінімального холостого переміщення інструменту при його переході від однієї ділянки до іншої

При чистовій обробці на трьохкоординатних верстатах з ЧПК довжина холостого переміщення при переході інструменту в межах двох оброблюваних ділянок залежить від локальної безпечної висоти, на яку інструмент повинен піднятися (безпечна висота забезпечує здійснення переходу інструменту від ділянки до ділянки без зіткнення інструменту з заготовкою або обробленою поверхнею деталі). Мінімальне значення локальної безпечної висоти h може бути прийнято таким, при якому відбудеться торкання поверхні, кінцевою частиною інструменту $f_c(x, y, z,)$ з поверхнею деталі $F(x, y, z)$.

Умову торкання двох поверхонь описує рівняння:

$$F(x_m, y_m, z_m) = f_c(x_m, y_m, z_m) \quad (a) \quad (1.1)$$

де: x_m, y_m, z_m - координати точки дотику.

Мінімальне значення локальної безпечної висоти h_{min} :

$$h_{min} = z_m + l_{pr} + h_z \quad (1.2)$$

Однак, як показує практика, для деталей зі складними поверхнями, що мають велику кількість екстремумів, виявляється важким створити математичне рівняння $F(x, y, z)$ і вирішити рівняння (a).

У таких випадках можна скористатися універсальним і стійким методом, заснованим на кластерному аналізі моделі, який здатний досліджувати поверхню деталі будь-якої геометричної форми. Особливістю даного методу є розбиття електронної моделі деталі, що містить складні поверхні, на кластери (масиви точок).

Кластерний метод дозволяє визначити z_m за наступною формулою:

$$z_m = \max(z_i) \quad i \in P \quad (1.3)$$

де: i - i -а точка, що належить контрольованій геометрії P ; z_i - координата центру інструменту, визначена за умови зіткнення кластера інструменту з i -тою точкою (рис. 1.8).

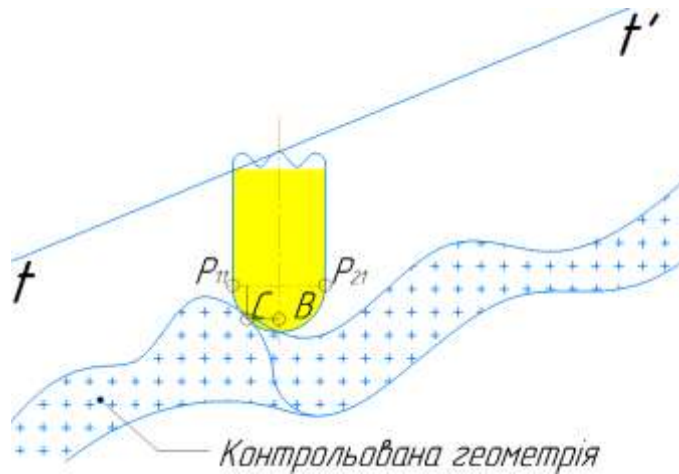


Рис. 1.8. Схема контакту інструменту з точкою на контрольованій поверхні

Отже, найкоротший маршрут від попереднього ділянки до подальшого при чистовій обробки деталі зі складною поверхнею може бути розрахований із застосуванням кластерного методу.

1.2.2.2. Метод визначення найбільш ефективної послідовності обробки обраної ділянки заданими інструментами

Алгоритм оптимізації траєкторії холостих переміщень представлений в роботі [83].

Математична модель, розроблена автором, дозволяє визначити послідовність виконання переходів за умови мінімізації довжини траєкторії холостих переміщень інструменту при переміщенні між двома заданими точками і наявності різного роду обмежень (геометрія оброблюваної заготовки і пристосування, обмежень, пов'язаних з розмірами робочої зони верстата та ін.).

При цьому на першому етапі розраховуються всі можливі варіанти (допустимих і недопустимих) послідовностей за відомою формулою евристичного алгоритму:

$$M^{(0)} = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n, \}, i=1, \dots, n \quad (1.4)$$

де a_i - технологічний перехід; n - необхідна кількість переходів для обробки заготовки.

Загальна теоретична кількість різноманітних варіантів послідовностей обробки однієї деталі (рис. 1.9) може бути $N^{(0)} = n!$.

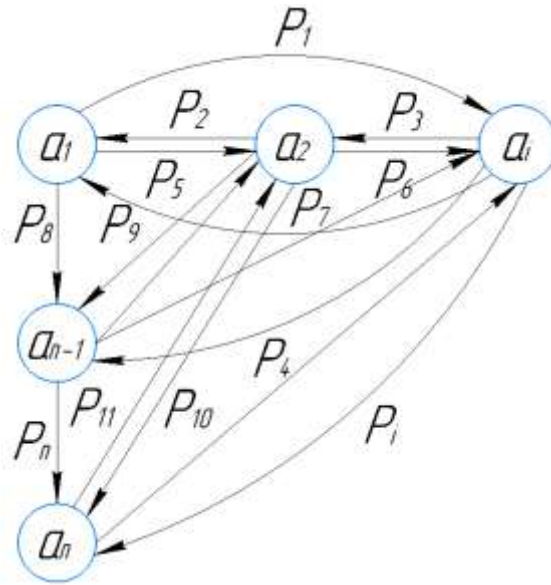


Рис. 1.9. Граф можливих технологічних переходів при обробці деталі [83, с. 69].

На другому етапі виключаємо недопустимі послідовності переходів технологічного процесу, які представлені у вигляді множини:

$$M^{(-)} = \{ \{a_{1l}^{(1)}, a_{2l}^{(1)}, \dots, a_{rl}^{(1)}\}, \dots, \{a_{1i}^{(i)}, a_{2i}^{(i)}, \dots, a_{ri}^{(i)}\}, \dots, \{a_{1s}^{(s)}, a_{2s}^{(s)}, \dots, a_{rs}^{(s)}\} \}, \quad (1.5)$$

$$i=1, \dots, S, \quad j=\overline{1, S}, \quad a=1, \dots, r$$

де $\{a_{1i}^{(i)}, a_{2i}^{(i)}, \dots, a_{ri}^{(i)}\}$ - i -та недопустима послідовність переходів технологічного процесу; S -множина недопустимих ланок переходів; $a_a^{(j)}$ - a -й перехід у складі j -ї недопустимої послідовності; r -число переходів в j -ой послідовності.

На третьому кроці автор порівнює допустимі послідовності між собою на предмет максимально ефективного маршруту з мінімальним часом холостого переміщення інструменту.

Результатом даного кроку є визначення загального часу траєкторій переміщення інструменту:

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=0}^n \sqrt{\frac{(x_{i+1} - x_i)^2}{V_x} + \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{V_y} + \frac{(z_{i+1} - z_i)^2}{V_z}} \\ &= \sum_{i=0}^n \sqrt{\frac{(x_{i+1} - x_i)^2}{V_x} + \frac{(\xi_{i+1} - \xi_i)^2}{V_y} + \frac{(\psi_{i+1} - \psi_i)^2}{V_z}} \\ &= \sqrt{\frac{(\Delta x)^2}{V_x} + \frac{(\xi_1 - y_0)^2}{V_y} + \frac{(\psi_1 - z_0)^2}{V_z}} + \sqrt{\frac{(\Delta x)^2}{V_x} + \frac{(y_{n+1} - \xi_n)^2}{V_y} + \frac{(z_{n+1} - \psi_n)^2}{V_z}} \\ &+ \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{\frac{(\Delta x)^2}{V_x} + \frac{(\xi_{i+1} - \xi_i)^2}{V_y} + \frac{(\psi_{i+1} - \psi_i)^2}{V_z}} \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\Delta x = \frac{x_{n+1} - x_0}{n+1}, x_{i+1} = x_i + \Delta x, i = 1, \dots, n, y \rightarrow \xi, z \rightarrow \psi \quad (1.7)$$

Де x_i, y_i, z_i - координати опорних точок P_i траєкторії; V_x, V_y, V_z - проекції швидкості

переміщення робочого органу; ξ та ψ - випадкові, змінні, що оптимізуються.

Найкоротша траєкторія переміщення інструменту вийде лише за умови мінімуму функції F:

$$F(\bar{\xi}, \bar{\psi}) \rightarrow \min, \bar{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n), \bar{\psi} = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n) \quad (1.8)$$

Після чого виникає необхідність в перевірці отриманої траєкторії на зіткнення інструменту з різноманітного роду перепонами.

У випадках коли координати (x_i, ξ_i, ψ_i) розташовані в забороненій зоні, знаходження найкоротшої траєкторії переміщення інструменту визначається шляхом мінімізації наступної функції:

$$f = \sqrt{\frac{(\xi_1 - y_0)^2}{v_y} + \frac{(\psi_1 - z_0)^2}{v_z}} + \sqrt{\frac{(y_{n+1} - \xi_n)^2}{v_y} + \frac{(z_{n+1} - \psi_n)^2}{v_z}} + \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{\frac{(\xi_{i+1} - \xi_i)^2}{v_y} + \frac{(\psi_{i+1} - \psi_i)^2}{v_z}} \rightarrow \min \quad (1.9)$$

Згідно до чого автор обґрунтовує свою думку, що в результаті практичної реалізації алгоритму керування процесом побудови траєкторії холостих переміщень (рухів) інструменту на багатоопераційних токарних верстатах при обробці деталей з відношенням довжини до діаметру менше 0,5 виникає оптимізації допоміжного часу на 20-30% або штучного часу на 5-10%. При цьому задані параметри якості та точності обробки відповідають заданим показникам.

Запропонований алгоритм забезпечить пошук оптимальної послідовності виконання переходів на багатоцільових верстатах і холості переміщення інструменту з мінімальними затратами часу на їх виконання.

Побудувавши алгоритм автор не вирішив проблему з показником стійкості інструменту, від якого залежить не тільки кількість необхідного інструменту а й кількість необхідних замін, що в свою чергу впливає на час холостих переміщень. Задача мінімізації холостих переміщень інструменту вирішена для випадку, коли позиція початкової та кінцевої точок обробки на одній ділянці співпадають. Запропонований автором алгоритм слугує тільки для певного виду обладнання, а саме токарних багатоцільових верстатів з ЧПК. Для фрезерних верстатів, при обробці на яких, як правило, позиції початкових та кінцевих точок обробки не співпадають, застосування виведеного алгоритму або проблематичне, а подекуди й неможливе.

При обробленні на трьохкоординатному фрезерному верстаті довжина холостого переміщення від попередньої ділянки до наступної не дорівнює відстані при русі в зворотному напрямку у зв'язку з різними координатами початкової та кінцевої точок при врзанні та виході ріжучого інструменту, а також геометричними особливостями поверхні деталі. Враховуючи дану проблему то задачу визначення оптимальної послідовності обробки окремих ділянок можливо розглянути як логістичну транспортну задачу, а саме до «асиметричної задачі маршрутизації транспорту з обмеженням за

вантажопідйомністю» (asymmetric capacitated vehicle routing problem – ACVRP).

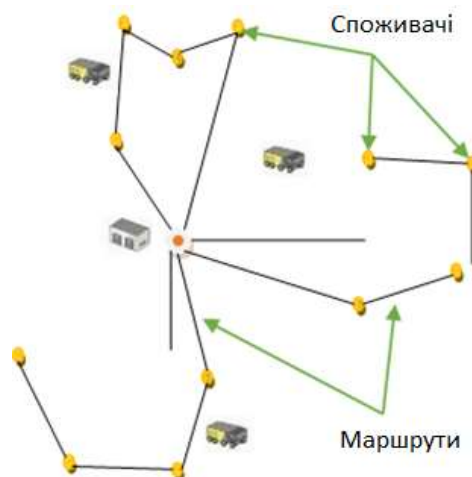


Рис. 1.10. Приклад маршруту системи ACVRP

ACVRP – це задача комбінаторної оптимізації та лінійного програмування, в якій для парку транспортних засобів однакової місткості, розташованих в одному депо, необхідно знайти мінімальні за витратами (грошовими, часу або відстані) замкнуті маршрути, які б цілковито дозволили б обслуговувати всіх клієнтів. При цьому всьому обов’язковою є умова обмеження місткості транспортного засобу на кожному з маршрутів (до того ж довжина маршруту від клієнта А до Б не рівна довжині маршруту від клієнта Б до А) [140, с. 315-338].

Подібність між завданням визначення оптимальної послідовності переходів від ділянки до ділянки і ACVRP наочно представлено у вигляді таблиці аналогів.

Таблиця 1.1. Аналогії між асиметричним завданням маршрутизації транспорту з обмеженням по вантажопідйомності і завданням визначення оптимальної послідовності переходів інструменту

Асиметрична завдання маршрутизації транспорту з обмеженням по вантажопідйомності	Завдання визначення оптимальної послідовності переходів інструменту від попередньої ділянки до подальшої
Депо	Позиція зміни інструменту
Парк транспортних засобів	Інструментальний магазин
Споживач	Ділянка
Вантажівка	Інструмент
Місткість вантажівки	Період стійкості інструмента
Необхідний вантаж на одного споживача	Необхідний час різання на одній ділянці

ACVRP відносяться до класу NP- складних обчислювальна складність завдання залежить від розміру вхідних даних задачах. Методи їх розв'язання надаються в працях G. Clarke, J.W. Wright [92], B. Gillett, L. Miller [108], B. Golden, T. Magnanti T., H. Nguyen [110], G. Laporte, F. Semet [116], P. Toth, D. Vigo [141], R. Baldacci, E. Hadjiconstantinou, A. Mingozi [84], D. Pisinger, S. Ropke [127], Ю.Л. Костюка, М.С. Пожидаева [48], R. Baldacci, E. Hadjiconstantinou, A. Mingozi [84] та інших.

Для розв'язання задачі ACVRP дуже часто використовують алгоритм Кларка-Райта, який передбачає поєднання дрібних маршрутів в більш великі до тих пір, поки є можливим зменшити сумарну вартість об'їзду (рис 1.10).

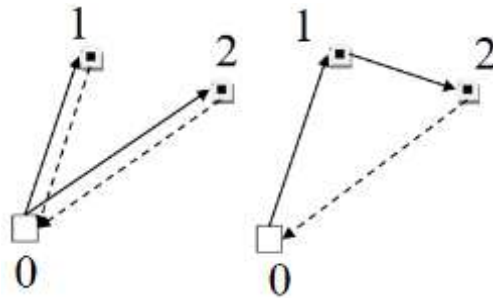


Рис. 1.10. Процес об'єднання дрібних маршрутів в більш розгалуженні

Результатом об'єднання двох і більше маршрутів є зниження загальної вартості (в працях авторів згадується поняття «збереження» (saving)).

Алгоритм передбачає виконання підготовчих етапів:

1. Обчислення заощаджень, одержуваних при об'єднанні пунктів i та j :
 $S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$; де $i, j = 1, \dots, n, i \neq j, c_{ij}$ – відстань між відповідними вершинами i, j .
2. Створення n маршрутів транспортних засобів $(0, i, 0), i = 1, \dots, n$.
3. Сортування заощаджень в порядку спадання.

Після закінчення підготовчих етапів виконуються покрокові операції розв'язання задачі.

Крок 1. На матриці заощаджень знаходимо осередок (i^*, j^*) з максимальним заощадженням S_{\max} :

$$S_{\max} = \max_{i,j} s(i,j) = s(i^*, j^*) \quad (1.10)$$

Три умови, що неодмінно потрібно виконувати:

- пункти i^* та j^* не входять до складу одного й того ж маршруту;
- пункти i^* та j^* є початковим та/або кінцевим пунктами тих маршрутів, у склад яких вони входять;
- комірка (i^*, j^*) не заблокована та розглядалась у попередніх кроках алгоритму.

При знаходженні такої комірки, що задовольнить трьома визначеним умовам, відбувається перехід до наступного кроку (Кроку 2). Якщо не можливо або не вдалось визначити таку комірку, то наступним кроком буде Крок 6.

Крок 2. Маршрут до складу якого входить пункт i^* , у подальшому будемо називати «Маршрут 1». Тоді маршрут у склад якого входить пункт j^* , відповідно назвемо «Маршрут 2». Вводимо наступне умовне позначення:

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ - множина одержувачів; $N_1 (N_1 \subset N)$ - підмножина пунктів, що входять до складу маршруту 1; $N_2 (N_2 \subset N)$ - підмножина пунктів, що входять до складу маршруту 2.

Виходячи з умов отримаємо, що $i^* \in N_1$, $j^* \in N_2$ та $N_1 \cap N_2 = \emptyset$ (згідно до кроку 1, умова 1).

Сумарний об'єм постачань за маршрутами 1 та 2: $q_1 = \sum_{k \in N_1} q_k$ та $q_2 = \sum_{k \in N_2} q_k$ де q_k - об'єм попиту k -го пункту.

Крок 3. Перевірка на виконання наступної умови: $q_1 + q_2 \leq c$, де c - місткість автомобіля.

Якщо умова виконується, то переходимо до кроку 4, якщо не виконується, то переходимо до кроку 5.

Крок 4. Об'єднання маршрутів 1 та 2 в один загальний маршрут X . Вважаємо, що пункт i^* є кінцевим пунктом маршруту 1, а пункт j^* - початковим пунктом маршруту 2. При об'єднанні маршрутів 1 та 2 повинні виконуватись наступні вимоги:

- послідовність розташування пунктів на маршруті 1 від початку та до пункту i^* не змінюється;
- пункт i^* зв'язується з пунктом j^* ;
- послідовність розташування пунктів на маршруті 2 від пункту j^* та до кінця не змінюється.

Крок 5. Кроки 1-4 повторюємо до тих пір, поки не знайдемо збереження S_{\max} , яке б задовольняло б трьома вимогам з кроку 1.

Крок 6. Розрахунок сумарного пробігу автотранспорту.

Алгоритм Кларка-Райта відноситься до числа наближених, ітераційних методів. Перевагами алгоритму безперечно є його простота, надійність та гнучкість, що дозволяє враховувати цілий ряд додаткових факторів, що впливають на кінцевий розв'язок задачі. Похибка розв'язку не перебільшує 5-10%.

Недоліками цього алгоритму є:

- по-перше - ефективність його роботи падає в міру наближення до кінця обчислень;
- по-друге - для вирішення потрібно багато часу, так як у всіх варіантах всі заощадження

повинні бути обчислені, збережені та відсортовані.

У працях Н. Paessens [126], Т.Т. Gaskell [106], Р. Yellow [148] алгоритм Кларка-Райта був модифікований за різними трактуваннями понять збереження та усунення вказаних недоліків.

Класичною евристикою завдання маршрутизації транспорту, є sweep-алгоритм (алгоритмом Свір) [108], [141]. При цьому положення споживачів задається в полярній системі координат. Поліус системи - точку 0 - розміщують в місці знаходження розподільного складу (див. Рис. 1.11).

Обирають початкове, нульове положення полярної осі $\varphi=0$. Положення споживача визначається відстанню від центру і кутом φ , що утворений полярною віссю і спрямований на споживача.

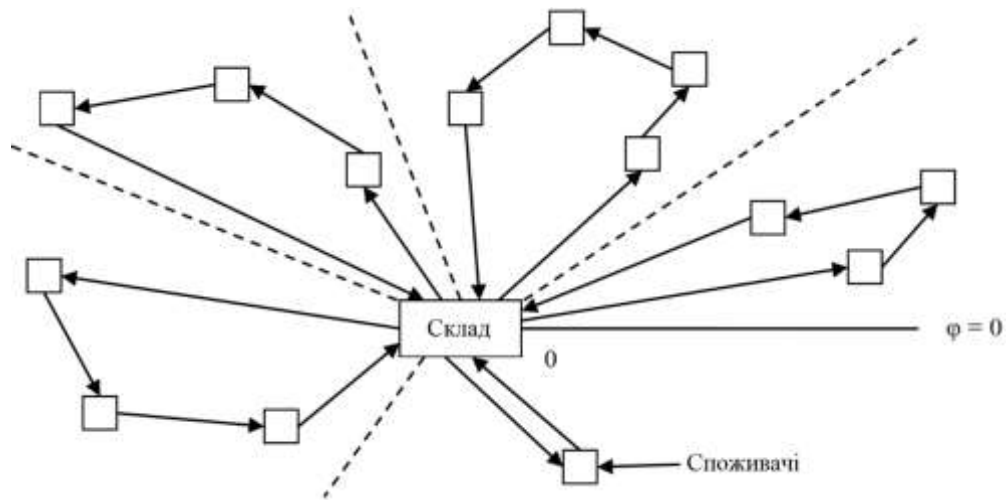


Рис.1.11. Вихідні дані до задачі складання кільцевих маршрутів та один із можливих варіантів її розв'язку

Суть алгоритму Свір полягає в тому, що полярна вісь, подібно щітці двірника склоочисника, починає обертатися проти або за годинниковою стрілкою. Як тільки сума замовлень досягає вантажопідйомності транспортного засобу, фіксується сектор, що обслуговується одним кільцевим маршрутом, і намічається шлях об'їзду споживачів. Примітно, що при однаковому положенні променю визначення сумарного вантажопотоку сектора, побудованого при «обході» проти і за годинниковою стрілкою, істотно відрізняються.

Сумарний вантажопотік при цьому визначається за формулою:

$$G_j = \sum_{i=1}^n l_{ij} \left(\sum_{i=1}^n q_{ij} + q_{TC} \right), i = 1, \dots, m \quad (1.11)$$

де і-номер кільцевого маршруту; n- число кільцевих маршрутів; j- номер ділянки кільцевого маршруту; m- число ділянок кільцевого маршруту; l_{ij} -довжина j-тої ділянки i-того кільцевого маршруту; q_{ij} - сумарне завантаження автомобіля на j-тій ділянці i-го

кільцевого маршруту; q_{TC} - власна маса автівки.

Аналогічно попередньому, визначається вантажопотоки для всіх секторів, для всіх кільцевих маршрутів. Сумарний вантажопотік визначається простим складанням вантажопотоків всіх маршрутів за формулою:

$$G = \sum G_i \quad (1.12)$$

Переваги алгоритму Свір оцінюються за якісними показниками розв'язку та за швидкістю розрахунку. Основний недолік цього алгоритму полягає в тому, що перший промінь проводиться в довільному напрямку без накладення якихось умов або принципів.

Згодом класичні евристики були витіснені метаевристиками. Останні дозволяють отримувати якісні рішення, але з попередньою процедурою варіацій керуючих параметрів, що містяться в їх описі [48, с. 56]. В якості методів метаевстик виступають: пошук з винятками; модельований і детермінований відпал; генетичний алгоритм; алгоритм на основі мурашиних колоній; нейронні мережі.

В роботі D. Pisinger, S. Ropke [127] представлений метаевристичний метод вирішення задачі маршрутизації транспорту, який представляє собою одну з версій адаптації відомого метаевристичного алгоритму - адаптаційний алгоритм пошуку по великим околицях (Adaptive Large Neighborhood Search) (рис. 1.12), який полягає в генеруванні нових рішень по спочатку запропонованого допустимому рішенням з урахуванням виявлення «Руйнують» і «відновлюють» околиць.

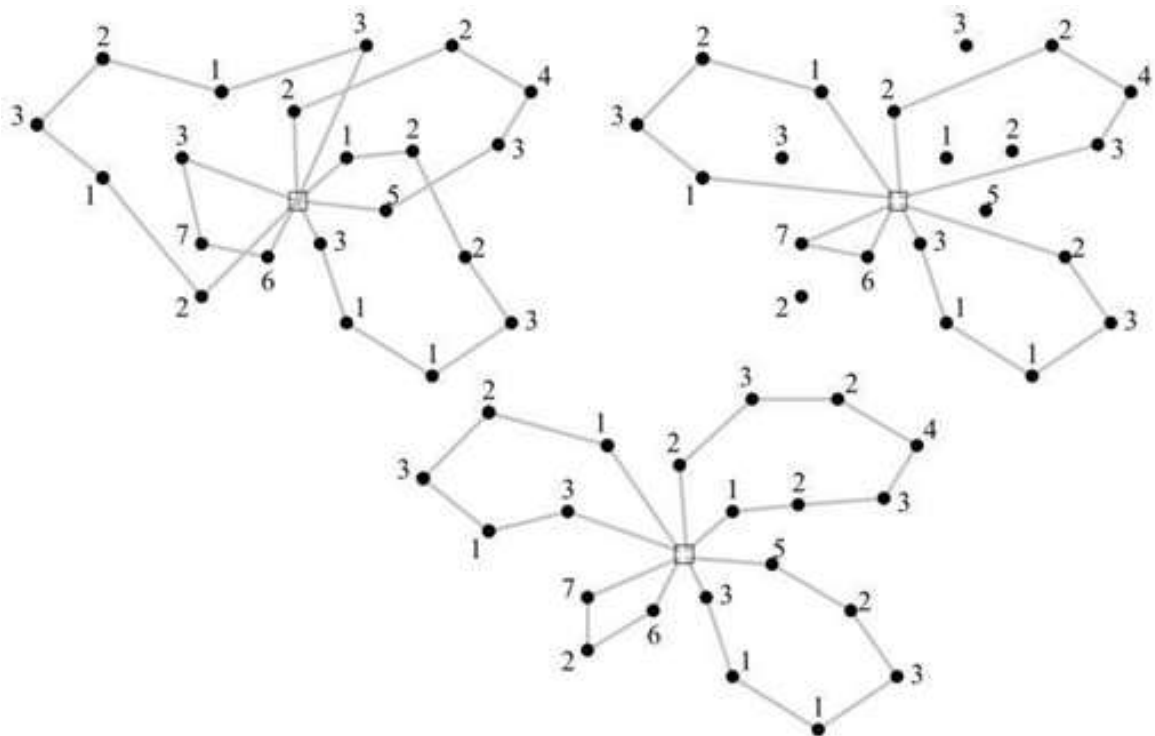


Рис. 1.12: Приклади «руйнування» та «відновлення»

Застосування цього алгоритму на практиці забезпечує досить швидке і точне рішення задачі транспортної маршрутизації з обмеженням по вантажопідйомності при великих величинах.

Проаналізувавши класичні та сучасні методи розв'язання задачі ACVRP, виявлені повні аналогії по відношенню до задачі визначення послідовності здійснення зміни інструментів і переходів його від одного оброблюваної ділянки до іншого при чистовому фрезеруванні складної поверхні на трьохкоординатних верстатах з ЧПК.

В якості критерію оптимізації загальної стратегії обробки виступає ефективність маршруту інструменту, що враховує взаємовплив інтересів всіх учасників системи: мінімальне число використовуваних інструментів, мінімальні довжини холостих переміщень при переході інструменту між послідовно робочою ділянками, мінімальна довжина холостих переміщень по знайденому найвигіднішому повного маршруту інструменту між усіма робочими ділянками .

Вирішити задачу пошуку мінімального холостого переміщення при переході інструменту між двома ділянками з урахуванням геометрії деталі та завдання оптимізації послідовності виконання переходів інструменту представляється можливим, використовуючи відомі підходи вирішення транспортної маршрутизації.

ВИСНОВКИ

1. Ґрунтуючись на відомій класифікації складних поверхонь, розглянувши обладнання, інструмент та софт-програми, що необхідні для формоутворення складних поверхонь шляхом фрезеруванням заготовки, сформовано перелік завдань, що належить вирішити, щоб оптимізувати загальну стратегію обробки.

2. Виходячи з вивчених та проведених раніше досліджень та експериментів, обираємо окрему стратегію обробки деталі: розбиття поверхні обробки на окремі ділянки, розв'язання задач для кожної ділянки, перевірка загального розв'язку задачі.

3. Розглянувши можливі варіанти загальної стратегії обробки деталі з складною поверхнею, для зменшення кількості варіантів, що підлягають аналізу визначимо критерій оптимізації, згідно до обраного методу розв'язку задачі визначимо оптимальну послідовність переходів інструменту від попередньої ділянки обробки до подальшої за основної умови, мінімізації холостих переміщень з урахуванням періоду стійкості інструменту.

2. АЛГОРИТМ ОПТИМІЗАЦІЇ ХОЛОСТИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ІНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ТРЬОХКООРДИНАТНИХ ВЕРСТАТАХ З ЧПК

2.1. Постановка задачі

Результати попередніх досліджень дозволяють зробити висновок, що скорочення часу різання (основного часу) при фрезеруванні складної поверхні деталі може бути досягнуто за рахунок обґрунтованого розподілу її на окремі конструктивно-технологічні ділянки, вибору інструментів відповідних їх конфігурацій, обґрунтованого призначення приватних стратегій обробки ділянок, позицій і траєкторії врізання-відведення інструмента. На час обробки впливає і стан заготовки на робочому столі верстату.

На продуктивність процесу чистової обробки деталей, що мають складні поверхні, впливає не тільки основний час різання, але і допоміжний. Одним з ефективних засобів зниження допоміжного часу є мінімізація холостих переміщень верстату, здійснюваних приводами для зміни інструментів і при рухах його між окремими ділянками обробки.

Саме проблемам пошуку найкоротших маршрутів при переміщеннях інструментів від одної оброблюваної ділянки до іншої, а також розв'язання задачі визначення найвигіднішої послідовності обробки ділянок при мінімальному числі змін фрез з урахуванням їх стійкості, присвячені справжні дослідження.

Проведене дослідження орієнтоване на:

- вид обладнання - трьохкоординатний фрезерний верстат з ЧПК, як найбільш часто використовуваний на практиці, надійний, нескладний в експлуатації і при програмуванні обробки деталей складної форми;
- вид обробки - чистове фрезерування, яке забезпечує необхідну високу якість поверхні, що найчастіше досягається за рахунок використання низьких швидкостей холостих переміщень для того, щоб зменшити вплив динамічних помилок, що неминуче призводить до збільшення допоміжного часу. Слід зазначити, що при чистовій обробці з високими вимогами до якості та обмеженою стійкістю фрез, характерна регулярність зміни інструменту. Це неминуче призводить до збільшення допоміжного часу, що витрачається на холості переміщення верстатних вузлів;
- тип інструменту - кінцеві циліндричні, сфероциліндричні, конічні фрези, які призначені для обробки складних поверхонь і широко використовуються для цих цілей на підприємствах;
- швидкість холостого переміщення інструменту при чистовій обробці ділянок за допомогою інструменту одного типорозміру - величина постійна на всіх холостих рухах фрез одного типорозміру. Дане припущення забезпечує спрощення при

розрахунку допоміжного часу, а зміни швидкості при холостих переміщеннях по величині і напрямку незначно позначаються на його величину;

- гарантований період стійкості інструменту при чистовому фрезеруванні прийнятий однаковим для всіх фрез одного типорозміру. При обробці на різних ділянках швидкість зносу фрез одного типорозміру може бути різною. Однак, при одних і тих же умовах різання, до яких відносяться, наприклад, частота обертання шпинделя верстата, швидкість подачі, значення стійкості фрез одного типорозміру можуть бути прийняті рівними.

Слід мати на увазі, що в результаті поділу складної поверхні на окремі оброблювані ділянки їх можна об'єднати в групи. При цьому для кожної з груп використовуються однакові набори фрез. Згідно з типовою технологією обробки процес фрезерування починається з обробки груп ділянок за допомогою кінцевої циліндричної фрези, потім використовуються сфероциліндричні і конічні фрези. Слід зазначити, що для груп ділянок поверхні, при обробці яких використовуються фрези одного типу, послідовність обробки визначається розмірами інструменту. На початку, обробка ведеться інструментом з найбільшим діаметром, а вже потім використовують фрези меншого діаметру.

Фрезою одного типорозміру здійснюється послідовна обробка кожної ділянки в складі групи. Необхідність заміни фрези на фрезу такого ж типорозміру виникне тільки тоді, коли вичерпано період її стійкості. Після заміни інструменту обробка може бути продовжена.

Аналогічним чином будується процес послідовної обробки всіх ділянок групи. Після завершення процесу обробки в групі ділянок за допомогою фрез одного типорозміру відбувається зміна фрези на інструмент іншого типорозміру для доопрацювання профілів в раніше оброблених групах ділянок і здійснюється перехід до наступної групи ділянок.

Процес обробки закінчується тоді, коли технологічний припуск на ділянках всіх груп повністю знищений.



Рис. 2.1. Схема переміщення фрез при чистовій обробці поверхні на трьохкоординатному верстаті з ЧПК

У загальному вигляді переміщення фрез від ділянки до ділянки і руху при заміні фрез в процесі чистової обробки складної поверхні може бути представлено у вигляді схеми (рис. 2.1). З якої випливає, що фреза переміщується зі збільшеною швидкістю подачі від точки О зміни фрез до початкової точки підходу, розташованої в площині безпеки. Після цього фреза опускається до початкової точки врізання, в якій відбувається перемикання приводів на швидкість подачі різання і виконується процес врізання. Далі процес формоутворення відбувається з режимами руху різання. По завершенню процесу різання фреза відводиться з кінцевої позиції різання і переходить в початкову точку повернення. На цій висоті здійснюється перемикання на прискорену подачу.

При переході до іншої ділянки без зміни інструменту фреза піднімається вертикально на «відстань безпеки» в площину ЛПБ над оброблюваною поверхнею і знаходиться по горизонталі на «відстані безпеки» від островів, порожнин або стінок, яке забезпечує роботу шпинделя і інструменту без зіткнень із заготовкою. При необхідності зміни інструменту відбувається підйом фрези в площину безпеки і її переміщення до точки О.

Холості переміщення зі збільшеною швидкістю подачі відбуваються при русі інструмента з кінцевої точки відводу до точки його зміни О, а при необхідності зміни фрези - в процесі руху з точки О до початкової точки врізання і при русі від кінцевої точки відводу до початкової точки врізання в заготовку наступного оброблюваної ділянки. Визначення маршруту переміщення фрез, при русі по якому величина холостих переміщень отримала б мінімальне значення, в кінцевому рахунку, дозволяє оптимізувати допоміжний час, істотно підвищити продуктивність процесу обробки і скоротити верстатний час.



Рис. 2.2. Схема розподілу часу обробки

З рис. 2.2. випливає, що допоміжний час, що витрачається на холості переміщення при зміні фрез і при зміні оброблюваної ділянки, є однією зі складових оперативного часу.

Оперативний час обробки тор можна отримати з поєднання загального та допоміжного часу та може бути визначений за формулою:

$$t_{op} = \sum_{k=1}^p t_{ok} + \sum_{i=1}^q t_{vi} \quad (2.1)$$

де, t_{ok} - загальний час k -го технологічного переходу; p - число технологічних переходів; t_{vi} -допоміжний час (час виконання i -го допоміжного переходу); q - число допоміжних переходів.

При цьому допоміжний час t_{vi} на виконання i -го переходу технологічного процесу за необхідності зміни фрез, який містить у собі індексацію магазину, транспортування інструменту з магазину в точку зміни фрез, підвід до початкової точки обробки ділянки та відвід його з кінцевої точки траєкторії в точку зміни рахується за формулою:

$$t_{vi} = t_c + t_{fi} + \frac{l_{i0} + l_{0i}}{v} \quad (2.2)$$

де, t_c - постійний час зміни фрези; t_{fi} - час індексації магазину, пов'язане з порядком розміщення інструменту в магазині та послідовності виконання операцій технологічного процесу; l_{i0} - довжина холостого переміщення від кінцевої точки ділянки, що оброблюється до точки зміни інструменту; l_{0i} - довжина холостого переміщення від точки зміни в початкову точку i -тої оброблюваної ділянки; v - швидкість холостих переміщень.

Також потрібно врахувати, що до довжини l_{0i} входять, як довжина холостого руху з точки зміни фрези О до поверхні ПБ, так і довжина холостого переміщення від поверхні ПБ до точки зміни фрез О (рис. 2.1).

Допоміжний час t_{vi} на виконання i -го переходу технологічного процесу при зміні оброблюваної ділянки визначається з рівняння (2.3).

$$t_{vi} = \frac{l_i}{v} \quad (2.3)$$

де, v - швидкість холостих переміщень; l_i - довжина холостих переміщень, враховуючи в себе повернення інструменту з кінцевої точки, ділянки, що оброблюється в початкову точку наступної ділянки обробки.

Довжина холостих переміщень l_i визначається відстанню повернення фрези з кінцевої точки відводу до локальної площини безпеки ЛПБ довжиною обходу та довжиною підводу (рис. 2.1).

Враховавши все це, можемо визначити більш точний допоміжний час t_v за наступною залежністю:

$$t_v = \sum_{i=1}^q t_{vi} = \sum_{j=1}^n (t_c + t_{fi} + \frac{l_{i0} + l_{oi}}{v}) + \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{v} \quad (2.4)$$

де, $n+m=q$; n - кількість технологічних переходів з зміною фрез; m - кількість технологічних переходів з зміною ділянок обробки.

Кількість технологічних переходів при зміні фрез n залежить від поставлених задачах та вимог до якості поверхні деталі:

- ❖ Для випадків максимально ефективного використання фрез, а саме коли їх період стійкості перед зміною повністю вичерпано, можливо лише коли до якості поверхні деталі, нормованого параметрами шорсткості, вимоги не є високими, здебільшого такі деталі після проведеної операції мають наступні рівні обробки.
- ❖ Для випадків, в яких вимоги до шорсткості поверхні високі або підвищенні, зміна інструменту повинна відбуватися одразу після того, як процес різання на ділянці повністю завершився. Якщо розрахований період стійкості, за розрахунками в процесі обробки певної деталі вичерпається раніше за завершення обробки, то зміна інструменту відбувається безпосередньо перед початком обробки деталі. Це дозволяє виключити появу сліду від взаємодії попереднього та наступних фрез з заготовкою та звести на нівець витрати на доводку.

З рівняння (2.4) виходить, що зміна послідовності обробки ділянок веде до зміни значення допоміжного часу.

Задля оптимізації виробництва, а саме для підвищення продуктивності обробки складної поверхні деталі шляхом фрезерування переміщення інструментів від однієї області обробки до іншої і до інструментального магазину верстату для його зміни повинні виконуватися по найвигіднішому маршруту, при переміщенні яким допоміжний час, що витрачається на холості переміщення мінімальний. При цьому технологічний процес повинен відбуватися з мінімальною кількістю використовуваних інструментів, з найкоротшими холостими переміщеннями при переході інструменту від однієї оброблюваної ділянки до іншої. Необхідно взяти до уваги, що при фрезеруванні таких поверхонь початкові точки врізання і кінцеві точки відведення інструменту не збігаються і що переміщення по всьому маршруту повинне відбуватися з мінімумом холостих рухів. При цьому необхідно враховувати стійкість інструменту.

Знаходження найвигіднішого маршруту необхідно виконати, щоб знайти оптимальний маршрут всіх вибраних інструментів різноманітних типорозмірів, використовуваних для обробки ділянок, що відносяться до однієї групи (рис. 2.3.). Також відповідно до заданого типу траєкторії (еквідистанта, зигзаг, тощо) відповідно до умов обробки, визначається точка врізання та точка виходу, що має не менший вплив на довжину холостого переміщення фрези. Зона безпеки постійно змінюється відповідно до

розташування оброблюваної ділянки та допоміжного обладнання (лещата, зажим, тощо), головне завдання якої не допустити зіткнення шпинделю (інструменту) з будь-чим окрім оброблюваної ділянки.

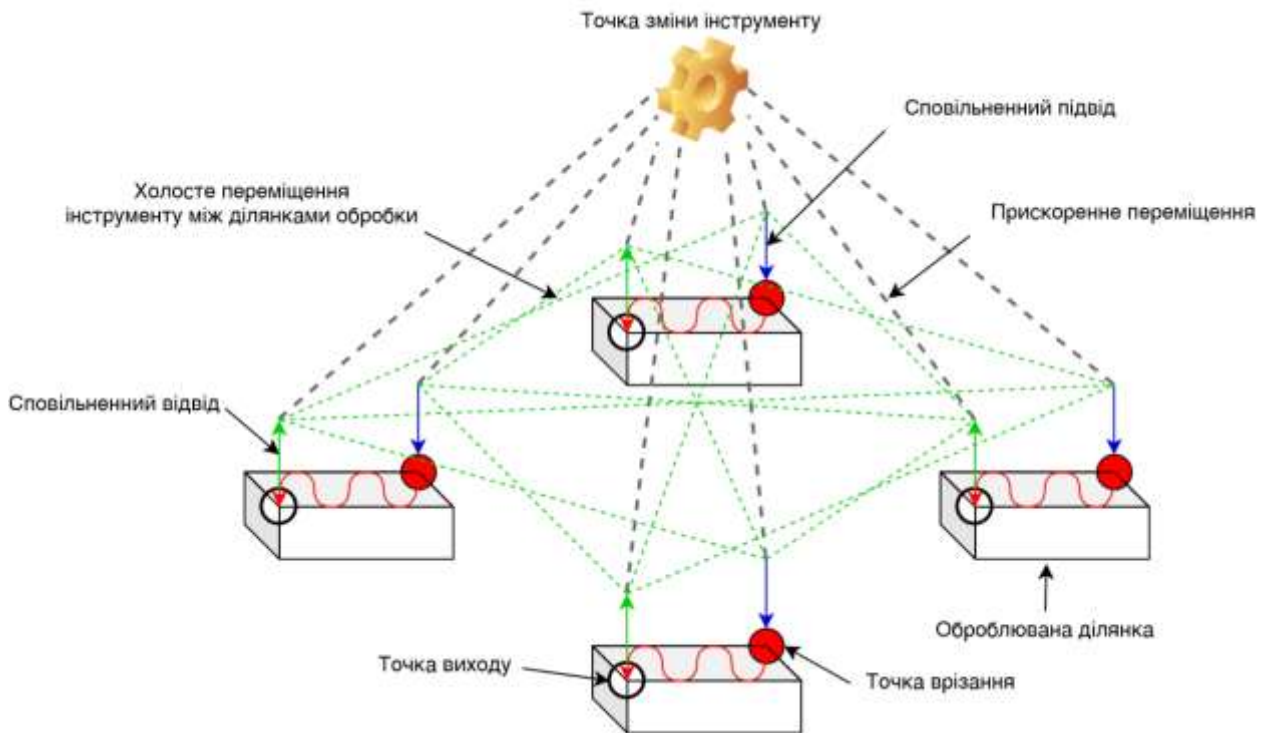


Рис. 2.3. Граф можливих варіантів послідовності обробки ділянок

Метод визначення оптимального маршруту фрез одного типорозміру, ґрунтується на основі проведеного дослідження, та дозволяє оптимізувати рух між однією групою ділянок, що підлягають обробці (рис. 2.4). Реалізація методу відбувається в два послідовних етапи:

Спочатку визначаємо точку врізання та точку виходу, згідно до траєкторії обробки, щоб розрахувати подальші довжин всіх пар ділянок, що входять в одну групу, тим самим визначається мінімальний шлях холостого переміщення при зміні оброблюваної ділянки. Також необхідно контролювати величину параметру положення локальної площини безпеки для двох послідовно оброблюваних ділянок (ЛПБ), намагаючись звести її до мінімуму, якщо такий можливо отримати.

Р.С. Логічно, що при мінімальному значенні ЛПБ є мінімальною довжина холостого переміщення, але можливі й варіанти, що при середньому значенні віддаленості ЛПБ отримаємо мінімальну величину холостого переміщення.

Другий етап, вирізняється використанням конкретних значень стійкості інструмента, що були попередньо визначені на першому етапі, та визначенням найвигіднішої послідовності обробки всіх ділянок з урахуванням стійкості інструмента, довжин холостих переміщень, зоною безпеки.



Рис. 2.4. Основні етапи розв'язку задачі оптимізації холостих переміщень при фрезеруванні складних поверхонь

2.1.1. Математична модель мінімізації холостих переміщень при зміні ділянки обробки

Розглянемо приклад пошуку мінімальної величини холостого руху при переході від обробленої ділянки до наступного без зміни фрез.

Як виходить з рівняння (2.3), довжина l_i i -го холостого переміщення інструменту з кінцевої точки T1 відводу (рис. 2.1) з координатами $(x_{i_1}, y_{i_1}, z_{i_1})$ обробленої ділянки в початкову точку T2 врізання з координатами $(x_{i_2}, y_{i_2}, z_{i_2})$ наступної ділянки (рис. 2.5) розраховується за формулою:

$$l_i = 2z_{lp} - z_{i_1} - z_{i_2} + \sqrt{(x_{i_1} - x_{i_2})^2 + (y_{i_1} - y_{i_2})^2} \quad (2.5)$$

де, z_{lp} - висота, на якій знаходиться локальна площина безпеки.

Звідси виходить, що значення l_i наблизиться до мінімуму, коли значення z_{lp} буде мінімальним: $z_{lp} \rightarrow \min \Rightarrow l_i \rightarrow \min$.

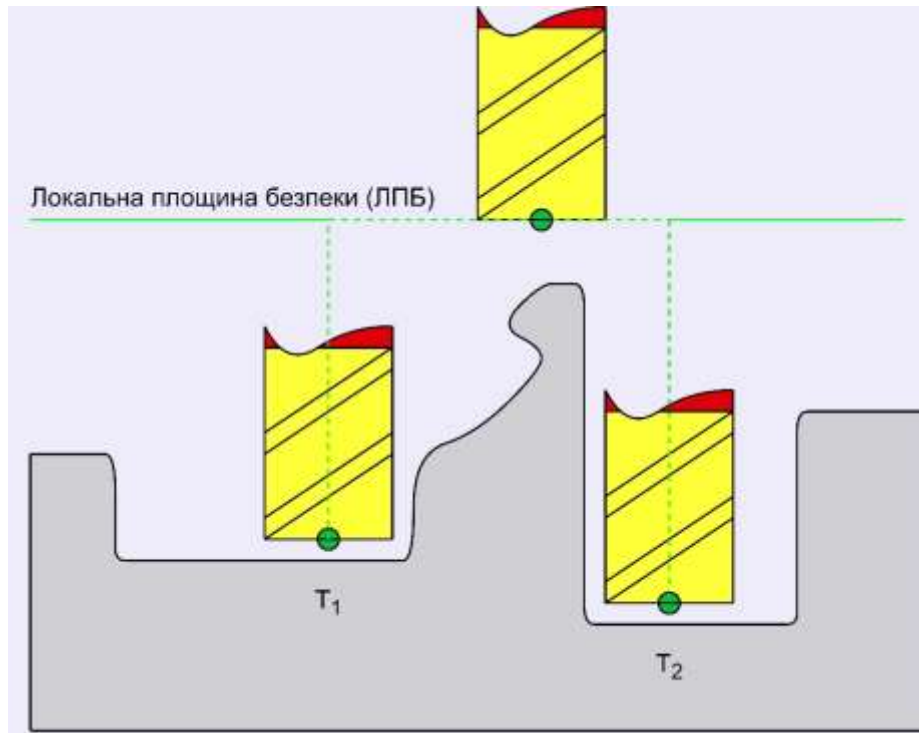


Рис.2.5. Схема переходу фрези при зміні оброблюваної ділянки

Мінімальне значення l_i може бути розглянуто, як вираз:

$$l_{i_{min}} = 2z_{lp_{min}} - z_{i_1} - z_{i_2} + \sqrt{(x_{i_1} - x_{i_2})^2 + (y_{i_1} - y_{i_2})^2} \quad (2.6)$$

Розглянемо на прикладі задачі, переміщення з точки $T1$ до точки $T2$ найбільший діаметр фрези утворює на поверхні стола та паралельній йому площині слід (рис. 2.6) у вигляді прямокутника $P1P2P3P4$, відповідно на поверхні деталі ми побачимо проекцію прямокутника $P1P2P3P4$, результатом буде утворення контрольованої геометрії $P1'P2'P3'P4'$. Приймаємо до уваги, що ширина прямокутника, ніщо інше, як найбільший діаметр фрези, а його довжина, відповідно, відстань від точки $T1$ до точки $T2$ по горизонтальній прямій tt' . Мінімальне значення висоти локальної площини безпеки $z_{lp_{min}}$ прийнято рахувати, як суму трьох значень: висоти z_k , на якій фреза торкається контрольованої геометрії (KI) деталі при русі її вздовж прямої tt' (рис. 2.6), припуску l_{pr} та резервної висоти h_z .

$$z_{lp_{min}} = z_k + l_{pr} + h_z \quad (2.7)$$

Для визначення z_k використовують, здебільшого, метод кластерного аналізу моделі. Особливістю даного методу, безумовно, є розбиття CAD моделі деталі, що містить складні поверхні, на кластери (масиви точок з координатами (x, y, z)). Дані координати точок можуть бути отримані за допомогою CAD систем

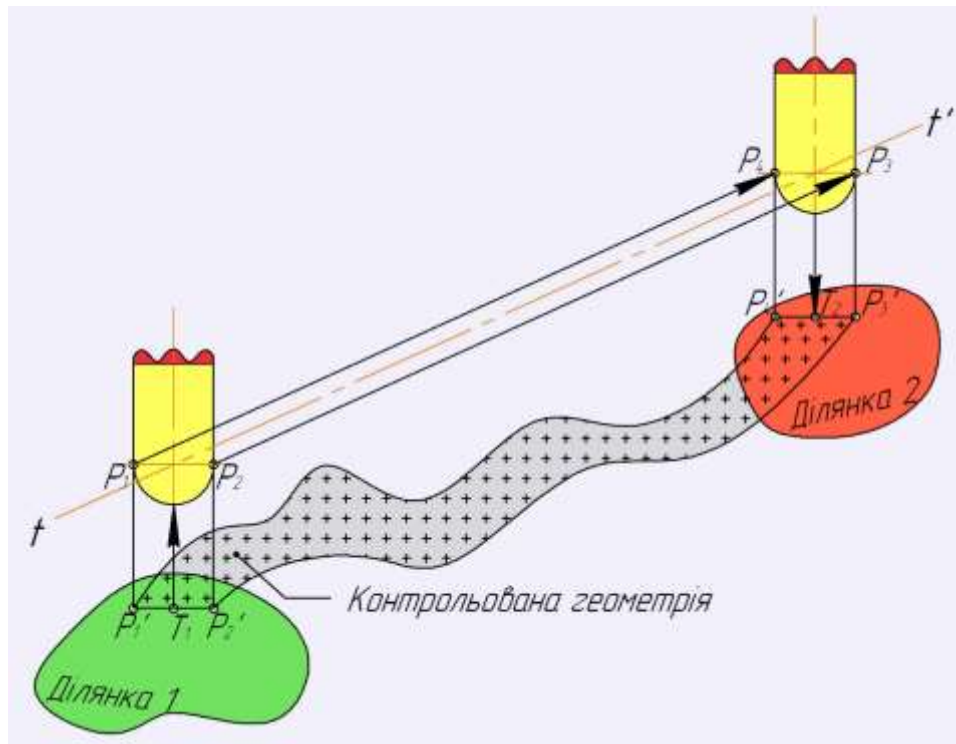


Рис. 2.6. Утворення контрольованої геометрії

Для визначення z_k можна використати метод кластерного аналізу. Головною метою якого є розбиття електронної моделі деталі, що включає складні поверхні, на кластери (масиви точок з координатами (x, y, z)). Дані координати точок можна отримати в системі CAD моделювання (наприклад Siemens NX).

Для розв'язання задачі визначення z_k при холостому переміщенні фрез визначеного типорозміру за напрямком tt' , необхідно мати вхідні данні, які повинні включати в себе інформацію о формі та розмірах ріжучого інструменту включаючи дані про масив точок з координатами (x, y, z) , що отриманні шляхом розбиття геометрії моделі площинами, що розташовані по нормалі відносно до вісі z , з заданою дискретністю h (рис. 2.7). Результатом виконаного розбиття тривимірної електронної моделі буде отримання таблиці координат проєкцій точок на ці площини (рис. 2.8.).

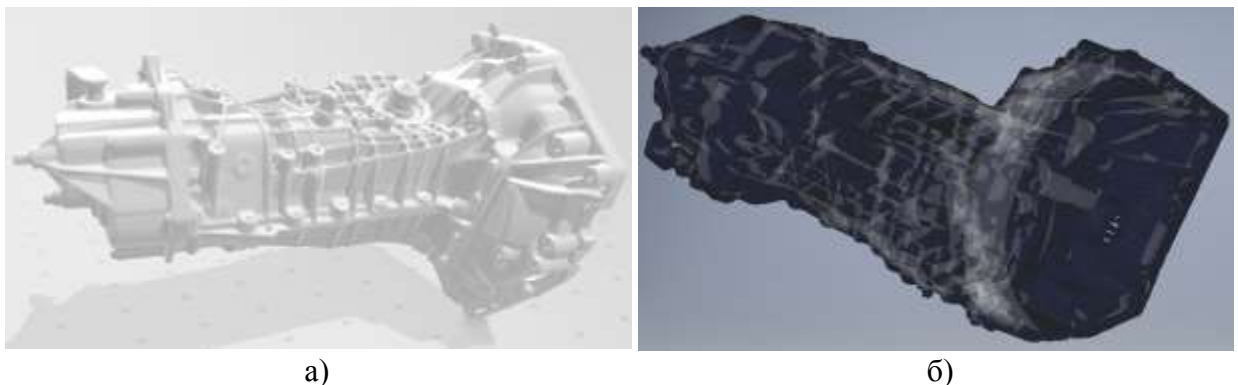


Рис. 2.7. Розбиття моделі на ділянки: а) тривимірна модель; б) тривимірна модель з виділеними масивами точок

Також можливе більш просте рішення, проблеми орієнтації деталі в промисловому просторі, розбити тривимірну модель на сітку, розмір якої можна задати відповідно до необхідної точності та розмірів моделі. Такий вибір буде однозначно простим та доступним на відміну від хмари точок, що можна отримати лише шляхом сканування готової продукції. Така побудова однозначно збільшить шлях холостого переміщення при точному моделюванні шляху фрези, оскільки побудовані сегменти будуть округлювати розмірні параметри деталі в більшу сторону, це наглядно можна відстежити з побудованої сітки деталі «Трансмiсія» а саме на прикладі повітряної решітки. Ми бачимо, що відбулася зміна геометрії отворів для зменшення часу розрахунку та спрощення моделювання.

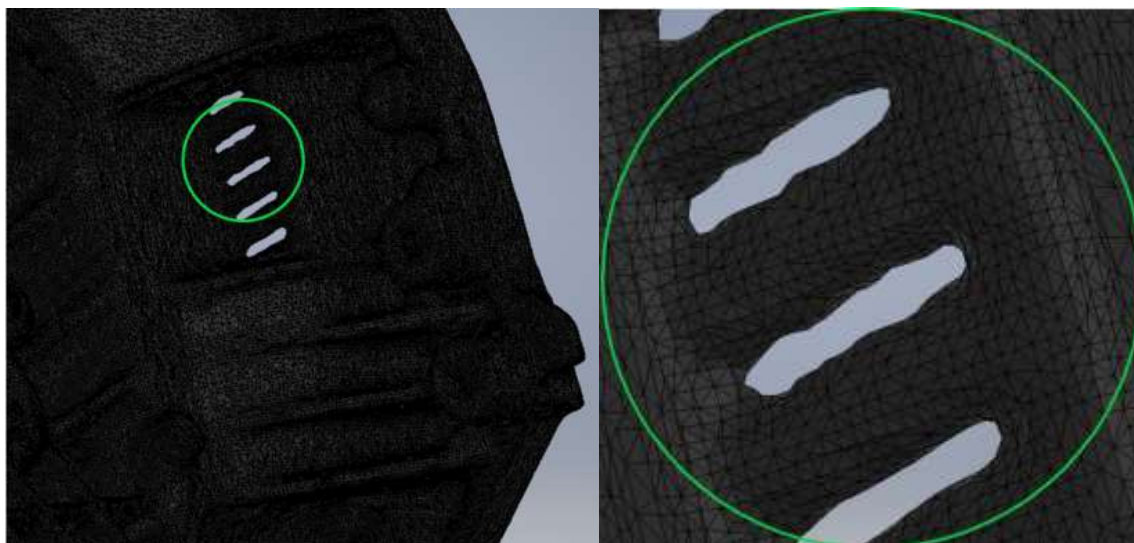


Рис. 2.8. Розбиття тривимірної моделі на сітку

Кластерний аналіз при розв'язанні задачі визначення z_k виконується покроково:

- Крок 1. Визначення точок, що належать до контрольованої геометрії та таких, що являють собою множину U ;
- Крок 2. Визначення координати z_{kj} , що описує собою ЛПБ, на якій фреза торкається точок, що належать до множини U , на j -тій висоті при її переміщенні вздовж направляючої tt' .
- Крок 3. Пошук максимального значення з отриманої множини (z_{kj}) , що є значенням висоти z_k , на якій фреза торкається контрольованої геометрії, що належить до тривимірної моделі при русі фрези за вектором tt' .

x	y	z
4.54568	8.35642	12.32545
4.54566	8.35642	12.32547
4.54565	8.35642	12.32549
4.54564	8.35642	12.32551
4.54563	8.35642	12.32553
4.54562	8.35642	12.32555
4.54560	8.35642	12.32557
4.54559	8.35642	12.32559
4.54558	8.35642	12.32561
4.54557	8.35642	12.32563

Рис. 2.8. Координати точок, що були отримані як результат розбиття тривимірної моделі

Першим кроком на шляху до отримання контрольованої геометрії буде визначення множини U та точок, що їй належать. Використаємо для цього найпростіші визначені геометричні побудови, наприклад прямокутник. Задаємо прямокутник $ABCD$ наступними параметрами: початкова точка $T_1(x_{i1}, y_{i1})$ та кінцева позиція $T_2(x_{i2}, y_{i2})$ (рис.2.9). Навіщо потрібне виділення прямокутника $ABCD$ серед всієї геометрії, даний крок спростить розрахунок, і забезпечить швидке орієнтування і позиціонування точок, що належать до контрольованої геометрії.

Визначити позиції точок, що належать до прямокутника $ABCD$ можливо за наступною формулою:

$$\begin{aligned} \min(x_{i1}, x_{i2}) - R &\leq x_i \leq \max(x_{i1}, x_{i2}) + R \\ \min(y_{i1}, y_{i2}) - R &\leq y_i \leq \max(y_{i1}, y_{i2}) + R \end{aligned} \quad (2.8)$$

де: R -радіус фрези.

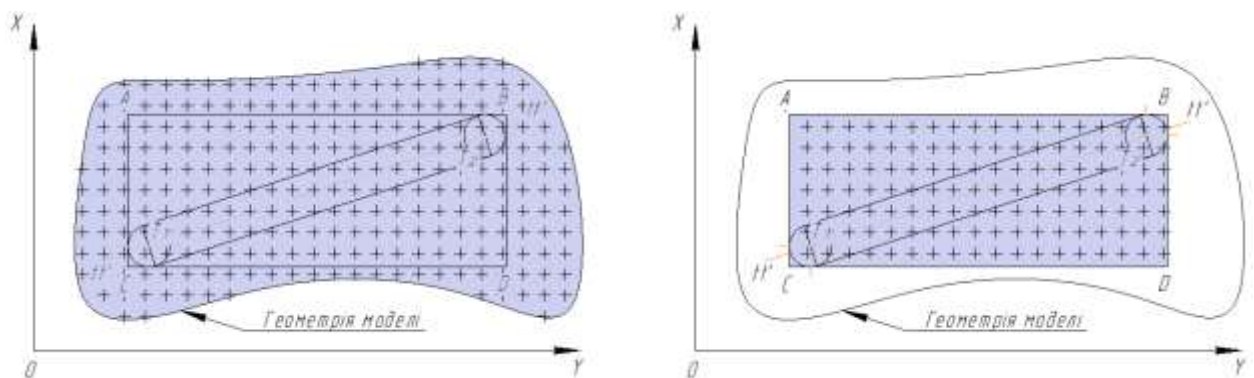


Рис. 2.9. Районування точок прямокутника $ABCD$

Оскільки отриманні результати попередніх обрахунків належать до плоскої системи координат $Oxyz$, а подальші обрахунки виконуються в полярній системі, необхідно виконати перехід до полярної системи (рис. 2.10).

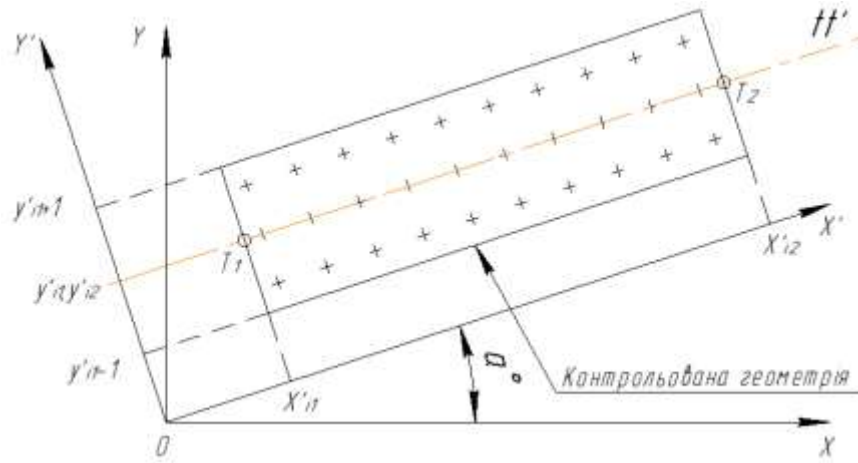


Рис. 2.10. Перетворення системи координат

Кут α визначається за формулою :

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{y_{i2} - y_{i1}}{x_{i2} - x_{i1}} \quad (2.9)$$

Формули для перетворення координат до системи $Ox'y'z'$ наступні:

$$\begin{aligned} x'_i &= x_i \cos \alpha + y_i \sin \alpha \\ y'_i &= -x_i \sin \alpha + y_i \cos \alpha \end{aligned} \quad (2.10)$$

З перетворених координат визначимо саме ті координати, що належать до контрольованої геометрії :

$$\begin{aligned} \min(x'_{i1}, x'_{i2}) &\leq x'_j \leq \max(x'_{i1}, x'_{i2}) \\ y'_{i1} &= R \leq y'_j \leq y'_{i1} + R \\ y'_{i1} &= y'_{i2} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Результатом буде отримання множини $U = \{x'_j, y'_j, z_j\}$, що буде мати в собі точки контрольованої геометрії.

Другим кроком потрібно визначити положення інструменту при русі вздовж напрямної tt' , що дозволить визначити мінімально допустиму висоту z_{\min} . Торкання оброблюємої поверхні буде відбуватись в точці $C(x_C, y_C, z_C)$ ($C \in U$). Для кінцевого типу інструменту точка C буде розташована в діаметральній площині, при цьому переріз фрези заданою площиною має найбільшу площу (рис. 2.11).

Значення z_{kj} в подальшому повинні бути визначені для трьох випадків застосування:

- до кінцевої циліндричної фрези (рис. 2.11 (а));
- до сфероциліндричної фрези (рис. 2.11 (б));
- до конічної фрези (рис. 2.11 (в));

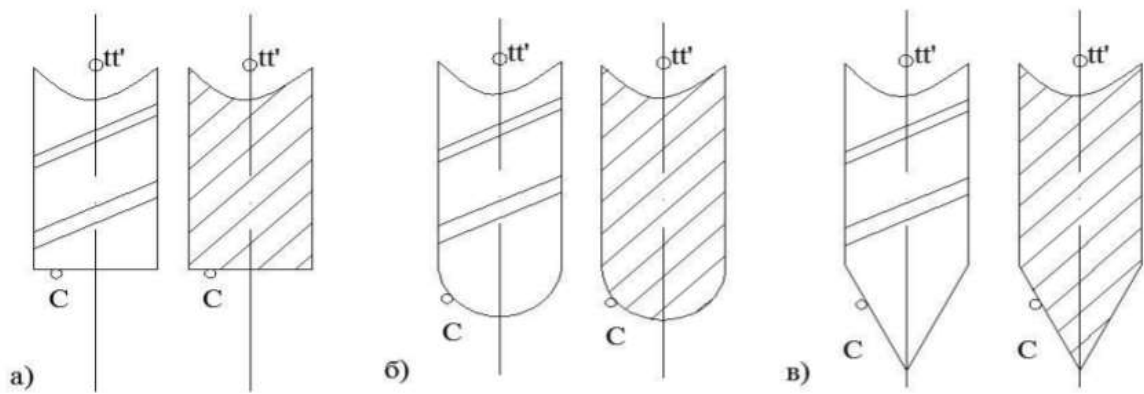


Рис. 2.11. Схема торкання фрези з контрольованої геометрією
а) кінцевою циліндричною; б) сфероциліндричною; в) конічною фрезами

З побудови рис. 2.12 виходить, що висота z_{kj} точки С для випадку кінцевої циліндричної фрези буде дорівнюватись висоті вершини D.

$$z_{kj} = z_D = z_C \quad (2.12)$$

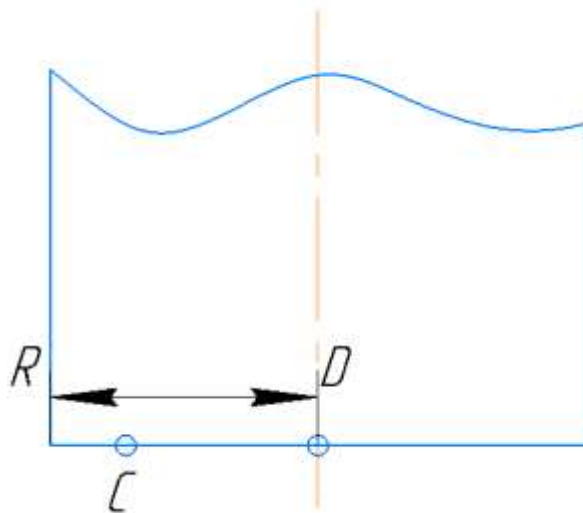


Рис. 2.12. Схема визначення розрахункової висоти вершини кінцевої циліндричної фрези при зіткненні з точкою С на контрольованій поверхні: R- радіус циліндричної частини фрези, D- вершина кінцевої циліндричної фрези

Для сфероциліндричної фрези процес визначення величини z_{kj} для точки С буде складніше, геометричні побудови на рис. 2.13. При фрезеруванні швидкість вершини (точка E) напівсфери при обертанні інструменту буде дорівнювати нулю, тому частина напівсфери сфероциліндричної фрези працює не ефективно та виключається з утворюючої інструменту. Для переходу фрези до безпечної зони при її зміні або переході від однієї ділянки до іншої, необхідно знати координати точки D, а не точки E (вершини фрези) (рис.2.13).

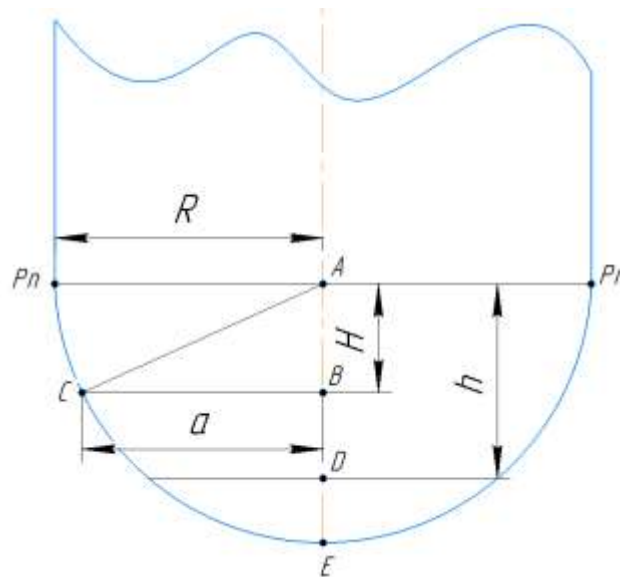


Рис. 2.13. Схема визначення розрахованої висоти вершинки сфероциліндричної фрези при зіткненні з контрольованою поверхнею.

Де: R – радіус циліндричної частини фрези; H – відстань від площини в котрій переміщується точка C (точка контакту) до центру напівсфери; h – відстань від торцевої площини, отриманої ріжучою частиною фрези, до центру напівсфери ($h < R$); a – відстань від точки C до вісі обертання фрези.

При цьому значення H слід розрахувати за формулою :

$$H = \sqrt{R^2 - a^2} \quad (2.13)$$

Відстань a від точки C до вісі обертання фрези, що перетинається tt' (рис. 2.14) слід визначати згідно рівняння:

$$a = y'_C - y'_B \quad (2.14)$$

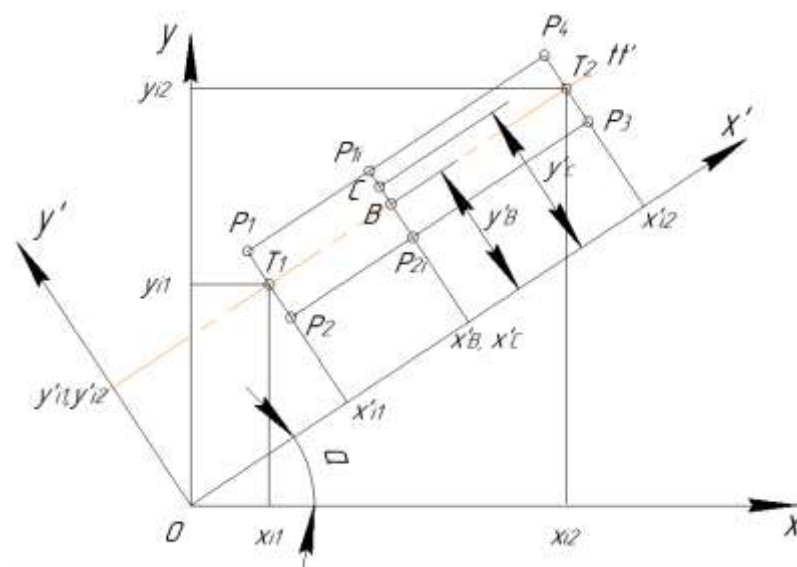


Рис. 2.14. Схема визначення розрахункової висоти вершини сфероциліндричної фрези при зіткненні з точкою C в системі координат $Ox'y'z$

В точних розрахунках неприпустимо втратити проміжок досліджень, тому розглянемо два можливих випадки:

- $H > h$, коли точка C буде належати до відкинутої частини напівсфери фрези. Таким чином торкання сфероциліндричної фрези з заготівлею в точці C буде мати такий самий характер, як при торканні кінцевою циліндричною фрезою в точці C , тим самим формула матиме наступний вигляд:

$$z_{k_j} = z_D = z_C \quad (2.15)$$

- $H < h$, випадок коли точка C не належить відкинутій ділянці напівсфери фрези. За такого випадку z_{k_j} може бути розрахованим за формулою:

$$z_{k_j} = z_D = z_C - AB - AD = z_C + H - h \quad (2.16)$$

- До будь-якої конічної фрези розрахунки z_{k_j} будуть спиратись на побудовах наведених на рис. 2.15.

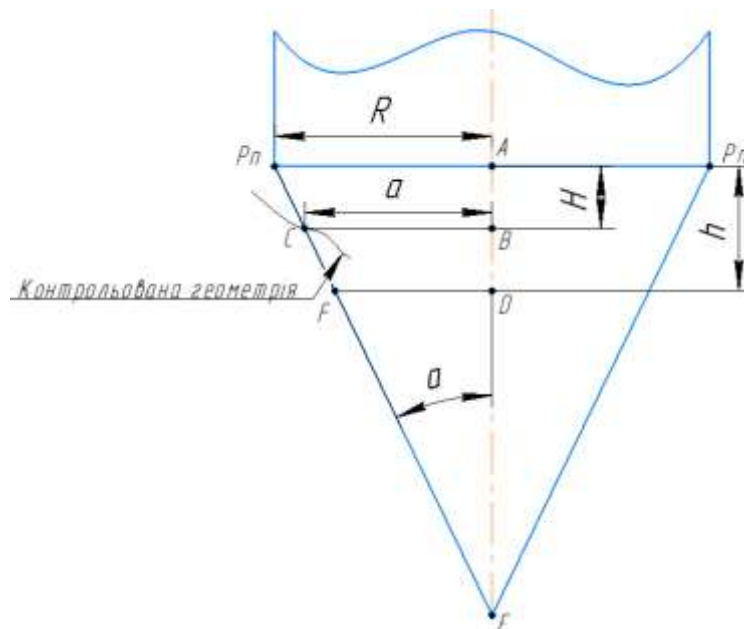


Рис. 2.15. Схема визначення розрахункової висоти вершини конічної фрези для роботи без зіткнення з точкою C на контрольованих поверхнях

де, R - радіус циліндричної частини фрези; H - відстань від площини, в якій відбувається переміщення точки C , до основи конусу фрези; h - висота зрізаного конусу від торцевої площини, що утворюється ріжучою частиною фрези, до основи її конічної частини ($h < R$); a - відстань від точки C до осі обертання фрези; α - кут конічної частини фрези.

Слід зазначити, що швидкість вершини конусу (точка E) при обертанні фрези буде дорівнювати нулю, тому частина конічної фрези буде працювати не ефективно та повинна бути виключена з утворюючої інструменту. Щоб фреза могла потрапити в зону безпеки

при її зміні або переході від однієї ділянки обробки до іншої, необхідно мати координати точки **D**, а не заданої характеристиками точки **E** (кінчика фрези) (рис. 2.15).

Знайти значення **H** при всіх вище зазначених параметрах можливо згідно формули:

$$H = AE - BE = \frac{R}{\tan \alpha} - \frac{\alpha}{\tan \alpha} = \frac{R - \alpha}{\tan \alpha} \quad (2.17)$$

Відстань **a** від точки **C** до вісі обертання конічної фрези можна розрахувати за аналогією до попередніх розрахунків, як і у випадку сфероциліндричної фрези, за формулою:

$$a = y'_C - y'_B \quad (2.18)$$

Як і в попередніх розрахунках необхідно розглянути два можливих випадки:

- **$H > h$** , коли точка **C** буде належати до відкинutoї частини конусу фрези. Таким чином торкання конічної фрези з заготовлею в точці **C** буде мати такий самий характер, як при торканні кінцевою циліндричною фрезою в точці **C**, тим самим формула матиме наступний вигляд:

$$z_{k_j} = z_D = z_C \quad (2.19)$$

- **$H < h$** , випадок коли точка **C** не належить відкинutoї ділянці конусу фрези. За такого випадку z_{k_j} може бути розрахованим за формулою:

$$z_{k_j} = z_D = z_C + AB - AD = z_C + H - h \quad (2.20)$$

У всіх випадках торкання фрези з кожною з точок, що належать до контрольованої геометрії (множини **U**), все це дає змогу визначити множину $\{z_{k_j}\}$.

Третім кроком провівши аналіз множини $\{z_{k_j}\}$, визначаємо максимальне значення висоти z_K , на якій фреза торкається контрольованої геометрії при русі її за направляючою tt' :

$$z_K = \max\{z_{k_j}\} \quad (2.21)$$

Всі ці кроки дозволяють нам знайти мінімальне значення довжини l_i *i*-ого холостого переміщення інструменту з кінцевої точки T_1 відводу обробляємої ділянки до початкової точки T_2 врізання на останній ділянці.

Якщо застосувати дану теорію в побудові математичної моделі мінімізації холостих переміщень при зміні обробляємої ділянки для всіх можливих холостих переходів фрез кожного з можливих типорозмірів між двома ділянками, можна отримати множину мінімальних значень довжин холостих переміщень фрез при моделюванні всіх переходів від однієї ділянки до іншої.

2.1.2. Математичне моделювання послідовності обробки ділянок складної поверхневої форми

Шукаючи оптимальний пройдений шлях інструментом, слід проаналізувати всі можливі варіанти послідовностей обробки заданих ділянок складної за формою поверхонь, фрезами одного типорозміру з врахуванням їх стійкості може бути використаний алгоритм мінімізації холостих переміщень від однієї оброблюваної ділянки до інших. Дана задача може бути описана графом $G=(V, E)$ з великою кількістю вершин $V=\{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ та ребер $E=\{e\}$ (рис.2.16).

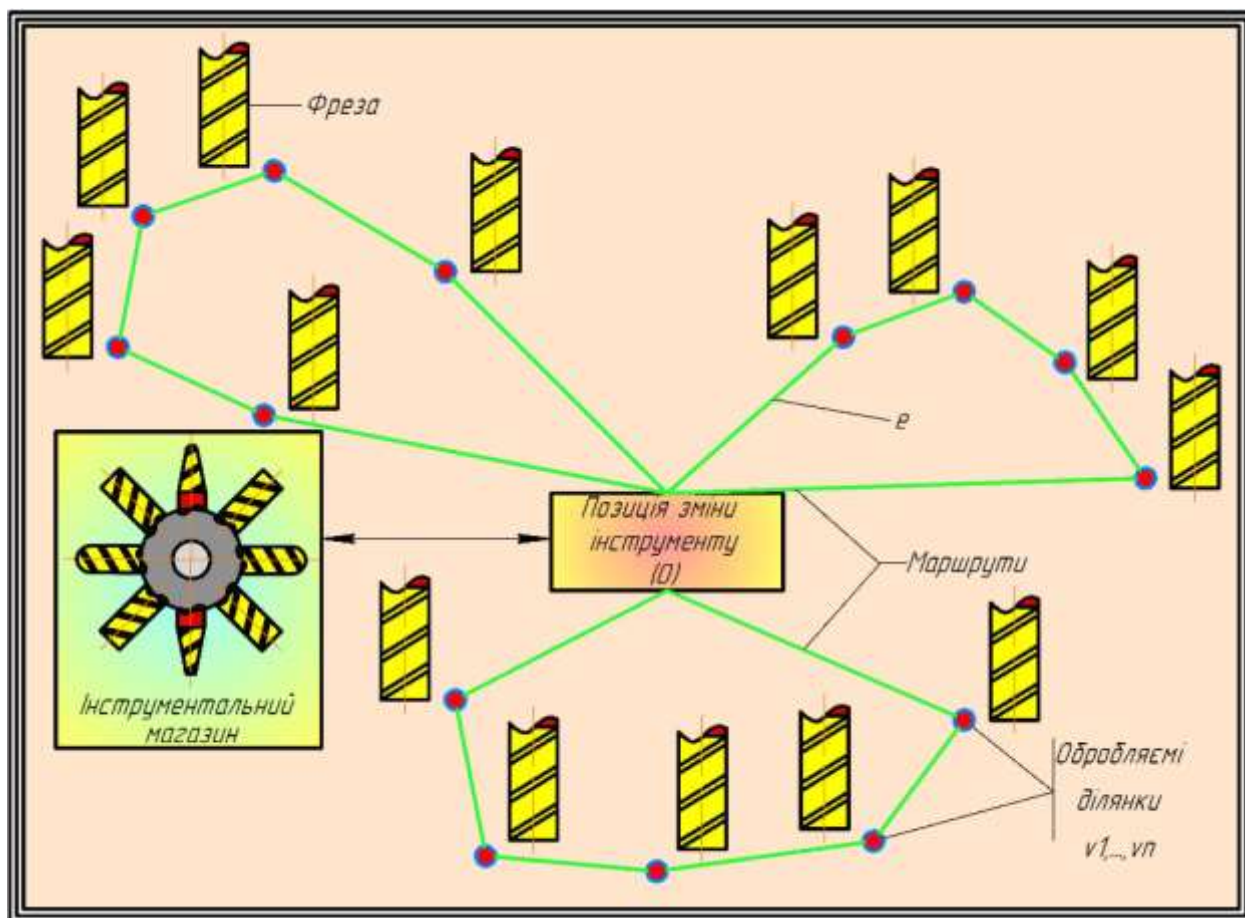


Рис. 2.16. Схема до розв'язку задачі маршрутизації інструментів

Рахуємо, що позиція зміни інструменту (фрез) буде v_0 , а ділянки обробки позначимо - v_1, \dots, v_n , довжину ребра $e \in E$, що з'єднує дві вершини графа з довжиною холостого переміщення C_e при зміні ділянки обробки. При побудові моделі час, за який фреза повинна завершити обробку ділянки - T_i ; гарантований період стійкості фрези - Q .

Необхідно знайти m маршрутів фрез з мінімальною сумарною довжиною їх холостих переміщень. Всі ці маршрути повинні мати початок та кінець в позиції зміни інструменту (фрез) v_0 , фреза повинна проходити через кожну ділянку v_i тільки один раз. При всіх цих параметрах необхідно врахувати ще й те, що кожна ділянка має бути оброблена однією

фрезою. Робочий час у кожної фрези не повинний перевищувати заданий період стійкості Q .

Задача такого роду можна вирішити двома існуючими способами: точним та наближеним.

Точний метод розв'язання застосовується в випадках невеликої кількості ділянок обробки і дає оптимальний варіант, але потребує великої кількості обчислень і витраченого часу.

Наближений метод розв'язку широко розповсюджений в випадках значно великої кількості ділянок обробки. На великих ділянках проведені розрахунки дадуть оптимальний результат, але можлива похибка оскільки всі данні будуть мати наближений характер, в деяких випадках це буде мати позитивну динаміку, не виключається і негативні явища (накопичення похибки, втрата стійкості).

Кожну складну поверхню можна поділити на мінімум десять ділянок, а отриманні ділянки ще на десять, тому є можливим застосування одного з точних методів так званого «жадного» алгоритму. Для поверхні з кількістю виділених ділянок застосовується адаптаційний алгоритм пошуку за більшими округами «Adaptive Large Neighborhood Search» (ALNS).

2.1.2.1. Алгоритми оптимізації послідовностей обробки ділянок

В науково-технічній літературі зустрічається приклад алгоритму оптимізації холостих переміщень прозваного «жадібний», його суть в виконанні семи послідовних кроків для знаходження мінімальної кількості холостих переходів.

Кроки, що передбачає «жадібний» алгоритм такі:

1. Описання всіх можливих варіантів послідовностей обробки окремих ділянок;
2. Виключення неприпустимих варіантів;
3. Для кожного допустимого варіанту формування множини варіантів послідовностей змін інструменту (фрез);
4. Виключення варіантів послідовностей змін інструменту (фрез), при яких час різання фрези перевищує її стійкість;
5. З варіантів, що лишились виокремлюємо ті випадки, в яких кількість змін фрез мінімальна;
6. Визначення допоміжного часу, що витрачено на холості переміщення фрез для кожного варіанту з мінімальною кількістю їх змін;
7. Обрання оптимального варіанту послідовності змін фрез з мінімальним допоміжним часом, що витрачений на холості переміщення фрез.

В результаті ми отримаємо одну з можливих послідовностей змін інструменту та оптимальну траєкторію переміщення з урахуванням стійкості інструменту до по черговості обробки.

Таблиця 2.1. Варіанти позиції зміни фрез

Кількість змін інструменту	1	2	3	4
Варіанти послідовностей змін інструменту		1,2,3-4-5		
	1-2,3,4,5	1,2-3-4,5	1-2-3-4,5	
	1,2-3,4,5	1-2-3,4,5	1-2-3,4-5	
	1,2,3-4,5	1-2,3,4-5	1-2,3-4,5	
	1,2,3,4-5	1,2-3-4,5	1,2-3-4-5	1-2-3-4-5

Проаналізувавши «жадібний» алгоритм виходить, що він дозволяє визначити найвигідніший варіант послідовності обробки окремих ділянок. Особливістю даного методу є обмеження за кількістю ділянок, що в випадках коли кількість ділянок більше десяти, кількість можливих варіантів послідовностей обробки цих ділянок дуже велика, що ускладнює роботу комп'ютера.

Більш продуктивним алгоритмом буде «адаптаційний алгоритм пошуку за великими округами», що дозволяє оптимізувати послідовності обробки ділянок.

Сутність елементу ALNS у синтезі різноманітних методів розчленування та об'єднання точок. Даний метод пошуку, вигідно виділяється з інших шляхів розв'язку задачі оптимізації, за рахунок пошуку мінімуму на великих округах. Сама система типу ALNS має на меті «руйнування» вже існуючої працюючої послідовності обробки окремих ділянок та подальше «відновлення» зруйнованої траєкторії. Результатом роботи адаптаційного алгоритму, буде отримання абсолютно нового варіанту послідовності обробки. Перевагами методу ALNS серед інших алгоритмів типу «руйнування»-«відновлення» є безпосередньо можливість оцінювати ступінь відповідності або доцільності всіх виконаних перетворень вздовж всього минулого алгоритму і в кожній його точці. Шляхом маркування кожної видозміни та використаного методу виділяється найвигідніший шлях майбутніх перетворень [127, с. 2405].

За вище переліченими засадами методу ALNS було сформовано оптимальний варіант послідовності дій:

1. Побудувати, такий алгоритм послідовності обробки ділянок x , який би одразу можна було застосувати на виробництві.

2. Уявити, що знайдений варіант x є найкращим можливим варіантом $x_b=x$, та, що міри методів руйнування/відновлення однакові $\rho^-= (1, \dots, 1)$ $\rho^+ = (1, \dots, 1)$.

3. Повторювати до тих пір, доки умова «стоп», не буде виконана.

3.1. Обрати методи руйнування $d \in \Omega^+$, використовуючи їх вагу ρ^- та ρ^+ .

3.2. Реалізувати процес руйнування та відновлення, в результаті отримати новий варіант $x_t = r(d(x))$.

3.3. Оцінити чи прийнятий варіант x_t . Якщо варіант x_t , прийнято то приймаємо наступну тотожність $x = x_t$ (x_t не буде прийнято, якщо він є виконуваним варіантом).

3.4. Проаналізувати допоміжний час для кожного з можливих варіантів x_t та x_b , якщо варіант x_t кращий за наявний варіант x_b ($t_v(x_b) > t_v(x_t)$), то $x_b = x_t$; відновити міри методу руйнування/відновлення ρ^- та ρ^+ .

4. Повернутись до x_b .

Для подальшого розв'язку задачі оптимізації холостих переміщень на верстаті з ЧПК необхідно виділити послідовність почергових дій для отримання оптимальної траєкторії.

2.2. Алгоритм оптимізації холостих переміщень на верстатах з ЧПК за динамічними характеристиками

Використавши вже отриманні, попередніми дослідниками, алгоритми, виокремивши в останніх найважливіші параметри, що відповідають моєму дослідженню. Через велику досліджувану ділянку та необхідну швидкість аналізу та побудови керуючої програми необхідно виокремити: дослідження на великих округах, швидкий метод, метод руйнування/відновлення, необхідно також отримати постійний аналіз та недопущення порушень в критичній площині безпеки, оптимізація вже існуючих траєкторій та побудова абсолютно нових шляхів без напрацювань.

Виходячи з вище зазначених параметрів алгоритму отримаємо наступну послідовність дій для отримання оптимальної траєкторії холостого руху верстату з ЧПК.

Крок 1.

Формування вхідних даних до задачі для її розв'язку:

- отримання координат вузлів точок поверхонь деталі;
- виділення числами ділянок, що оброблюються фрезою одного типорозміру;
- отримання координат вхідних та вихідних точок на кожній ділянці, для кожного типорозміру;
- форми та розмір фрез;

- додаткова відстань безпеки;
- розмірні параметри робочого простору обробки з врахуванням додаткового обладнання та оснастки.

Крок 1.1. Якщо наявна керуюча програма з виробництва (працездатна) використати в наступних побудовах її, попередньо перевіривши на помилки та наявність всіх необхідних даних. Якщо програма відсутня то переходимо до кроку 1.2, якщо наявна, то до кроку 2.

Крок 1.2. За наданими даними побудувати первинну просту траєкторію, з заданою площиною безпеки певною почерговістю переходів та враховуючи період стійкості інструмента передбачити його зміну за умови неперервності траєкторії обробки. Задавши всі необхідні параметри перевірити траєкторію на працездатність, усунути, якщо необхідно помилки та недоліки.

У нашому випадку розглянемо контурну систему управління. У програмному забезпеченні, створеному на базі досліджень, буде автоматично будуватися траєкторія (контур), яка буде перетворюватися в керуючий код верстата з ЧПК.

Розглянемо задання вхідних даних простою схематичною побудовою, з зонами безпеки з координатами вхідних та вихідних точок:

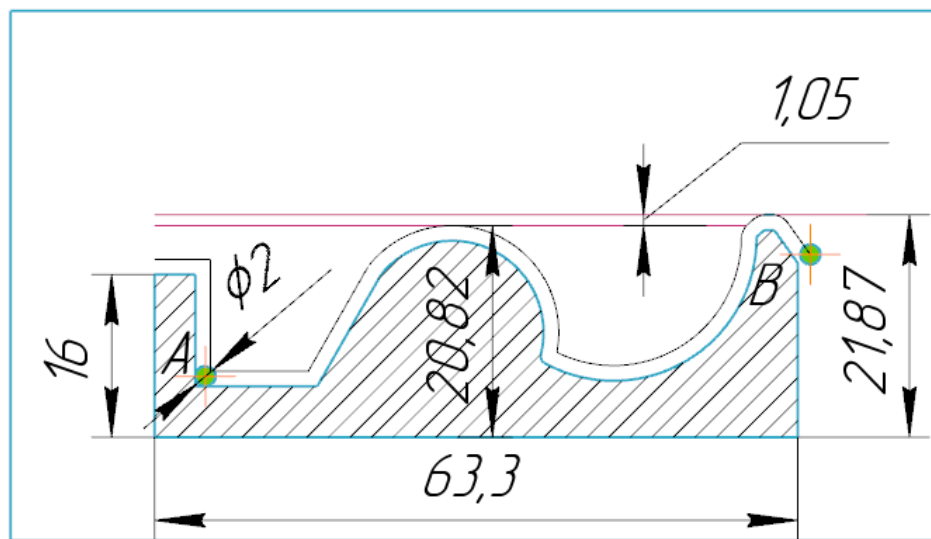


Рис. 2.17. Площина заготовки побудована за вхідними даними з виокремленням зон безпеки

Завдання переміститись з точки «А» у точку «В», найкоротшим шляхом та за найменший час, оминаючи площину безпеки.

Найпростішим способом переміщення є рух прямими, оскільки ним просто та зручно користувались при ручному керуванні верстатом. Даний метод мінімізує зіткнення з поверхнею заготовки або оснастки, але є найдовшим з усіх.

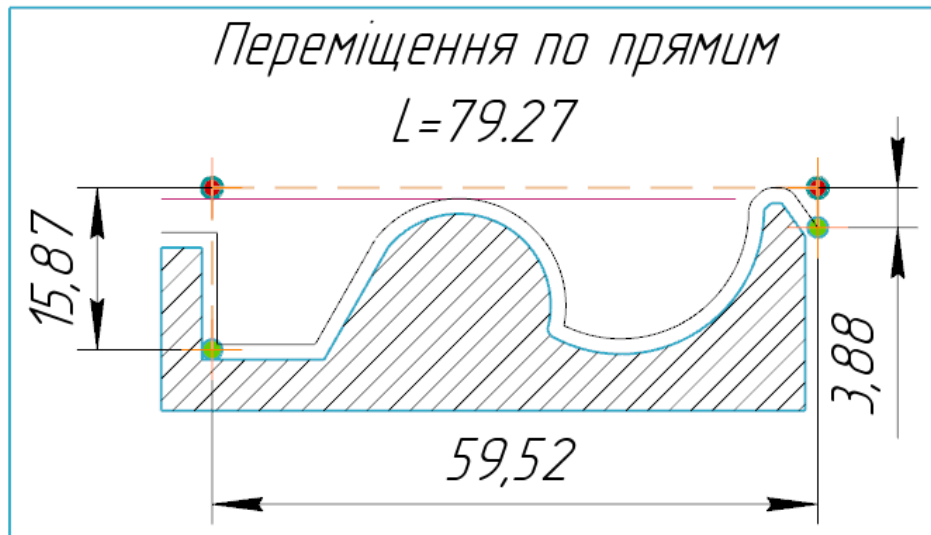


Рис. 2.18. Первинна проста траєкторія (рух прямими)

Використовуючи даний метод ми проходимо по лінії найвищого піку, що обумовлюється найвищою точкою заготовки або оснастки з додаванням площини безпеки.

Крок 2. Вважаємо, що отриманий попередньо варіант, є найкращим, наприклад x . Тоді наш модифікований варіант буде x_t - за часом або x_b - за шляхом. Кожне наступне перетворення вихідної траєкторії повинно якісно і кількісно покращувати параметри затраченого на перехід часу та зменшувати пройдений шлях, не погіршуючи вимоги динамічної системи.

Крок 3. Повторювати до тих пір, доки умова «стоп», не буде виконана.

Крок 3.1. Руйнуємо всі прямі кути траєкторії. Оскільки найгірший варіант, що значною мірою не влаштовує динамічну систему верстату це різка зміна напрямку з кутом в 90° , то необхідно кут зробити більш плавним. З появою сучасних CAD програм стало можливим швидко побудова еквідистанти. При цьому потрібно обрати площину заготовки і оснастки і задати відстань, на яку повинна зміститися траєкторія відносно них.

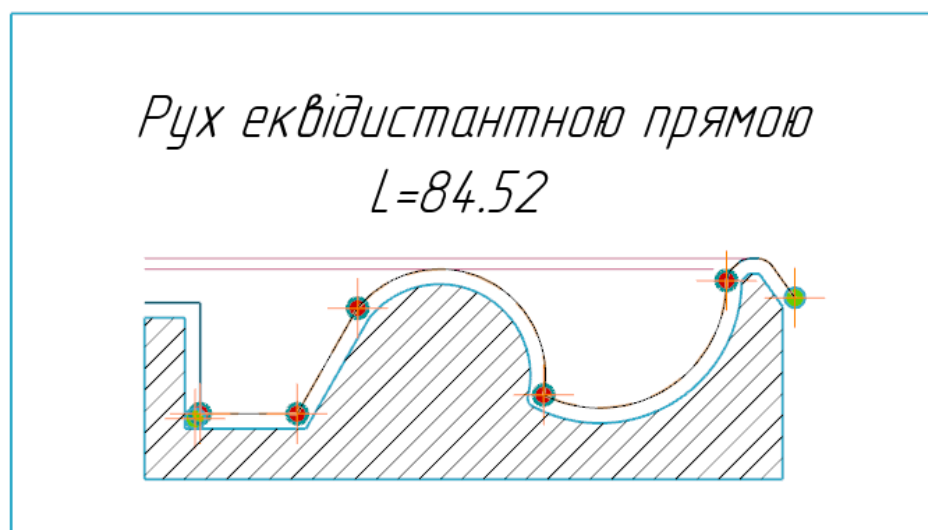


Рис. 2.19. Рух еквідистантною прямою

Як видно з рис. 2.19, площа безпеки збігається з побудованою еквідистантою, оскільки рівняння їх побудови однакові, а головною умовою є мінімальна відстань переміщення як щодо заготовки та оснащення, так і відстань пройденого інструментом шляху.

Крок 3.2. Відновити втрачені кути використавши один з методів апроксимації траєкторії, нам вдалося замінити траєкторію за прямими на еквідистантну криву.

Крок 3.3. Оцінити прийнятність отриманого результату, перевірити траєкторію на критичні помилки та перетин зони безпеки.

Провівши аналіз еквідистантної траєкторії загальна довжина стала ще довшою за рахунок складності поверхні і необхідності обходу широких поверхонь за дугою. Отже хоч і найкращими варіантами зробити плавний кут є сплайнові побудови, складні ламані, дуги, різного роду криві вони не завжди виконують головну вимоги: «якісно та кількісно покращувати попередньо отриману траєкторію»

Крок 3.4. Проаналізувати допоміжний час для кожного з можливих варіантів, порівнювати допоміжний час та шлях, до тих пір поки варіант $x_t = x_{\min}$, або $t_t = t_{\min}$ не буде знайдено. В нашому випадку отримали неприпустимий варіант з погіршенням вихідних умов. Тому в даному випадку необхідно повторити попередні кроки, виключивши даний випадок з дослідження.

Крок 3.5. Якщо виникає випадок $x_t = x_{\min}$, а $t_t \neq t_{\min}$ або $x_t \neq x_{\min}$, а $t_t = t_{\min}$ то записуємо обидва випадки для подальшого дослідження.

Крок 4. Повернутись до x_b .

Крок 4.1. Якщо на виході буде отримано два результати вивести $x_{b(t)}$ - за часом $x_{b(x)}$ - за шляхом.

Крок 4.2. Провести порівняння обох отриманих варіантів та визначити найбільш оптимальний з них.

Крок 5. Провести перевірку отриманого результату за динамічними характеристиками. Якщо результат незадовільний за можливістю допрацювати траєкторію. Якщо доопрацювання не допомогло/неможливе повторити кроки 1-4 виключивши попередньо отриманий результат з аналізу.

Крок 6. Прийняти до використання отриманий результат побудов. Розрахувати за ним ефективність оптимізації за: часом, шляхом, економією коштів, збільшення робочого часу до наступного технічного обслуговування.

ВИСНОВКИ

Провівши аналіз існуючих алгоритмів оптимізації, та їх роботи, я дійшов висновку, що розрахунки згідно побудованої математичної моделі повинні відбуватися виключно у автоматичному режимі, у зв'язку з їх складністю та чисельністю. Оптимізація або мінімізація холостих рухів повинна торкатись холостих переміщень при зміні оброблюємих ділянок, включати в себе оптимальну послідовність переходів від ділянки до ділянки і включати в себе можливість заміни інструменту. Використання всіх вище зазначених параметрів дозволяє отримати найвигідніший маршрут інструменту при обробці окремих ділянок фрезою одного типорозміру. При цьому допоміжний час, що необхідно витрати на холості переміщення для зміни інструменту (фрез) та при зміні ділянок обробки, мінімізується.

За допомогою адаптаційного алгоритму розв'язку задач оптимізації маршрутів до пошуку більш доцільного варіанту послідовності холостих рухів фрезерного трьохкоординатного верстату з ЧПК дозволила розв'язати задачу оптимізації. Це можна застосувати до формування стратегії обробки складних поверхонь деталі, за критерієм мінімізації допоміжного часу на переміщення інструменту при фрезеруванні.

Виходячи з адаптаційного алгоритму та математичного апарату, було вирішено вивести власну послідовність дій для побудови оптимальною траєкторії. Вирішено ряд питань необхідних для подальшого створення програмного продукту з оптимізації послідовностей виконання технологічних переходів, що включає в себе побудову нового типу траєкторії холостого руху інструменту, котрий в теорії вирішив задачу мінімізації холостих рухів інструменту при обробці фрезеруванням складних поверхонь на верстатах з ЧПК.

3. ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРІЇ ТРАЄКТОРІЇ ХОЛОСТОГО РУХУ. ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРЕЗЕРНОЇ ОБРОБКИ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

3.1. Динамічна характеристика

Нова концепція високоефективного виробництва висуває також вимогу переходу від організації виробництва з використанням широкої номенклатури верстатів вузькопрофільного напрямку на техніку до автономної організації з орієнтацією на персонал, від керованої роботи (АСУ) до колективної роботи, від висококваліфікованих працівників вузької спеціалізації до персоналу високої кваліфікації широкого профілю.

Головним чином усі можливі передумови для надшвидкого прогресу техніки і технології вже є і вони сприяли підвищенню технічного рівня верстатів з ЧПК. В першу чергу це досягнення в галузі мікроелектроніки і мікропроцесорної техніки (стрімке зростання ємності магнітних і оптичних носіїв інформації, можливості перетворення величезних масивів інформації у режимі реального часу; розроблення нових поколінь надпотужних і швидких комп'ютерів та мереж; впровадження у виробництво інформаційних технологій, числового та графічного моделювання процесів і їх оптимізація), а також здобутки в галузі виробничого устаткування і високодинамічних верстатів з ЧПК, їх компонентів та систем [27].

До останнього можемо зарахувати таке:

- використання нових видів і систем приводів потужністю до кількох сотень кВт, керованих безпосередньо від систем ЧПК верстатів;
- створення систем уніфікованого технологічного спорядження з орієнтацією на індивідуальний керований привід окремих інструментів з системами подачі у зону різання МОС під тиском до 450МПа;
- впровадження призматичних та циліндричних напрямних опор кочення, ковзання та гідродинамічні з ефектом „stick-slip”;
- інновації в галузі метрології, розроблення та впровадження високоточних систем і приладів контролю і регулювання швидкостей та прискорень під час механічних переміщень, потоків рідин та газів, стабілізації температури, тиску, вібрацій;
- використання систем ЧПК верстатами на основі багатомікропроцесорної змішаної структури на базі 32- або 64-бітових макропроцесорів в умовах діалогового режиму роботи;
- впровадження прогресивних матеріалошадних та енергоощадних технологій розроблення і впровадження новітніх методів оброблення металів і неметалевих матеріалів (оброблення струменем води високого тиску, енергією лазера, надзвукове оброблення струменем абразиву і спалюваного газу тощо) [27].

На верстатах останніх поколінь підвищення продуктивності досягають багатократним скороченням основного часу оброблення завдяки роботі з високими швидкостями різання та робочими подачами порядку. Але все є вичерпним, як можливість постійно збільшувати швидкість основного часу, зменшенню допоміжного часу заважає динамічна стабільність приводів верстату. Істотного скорочення допоміжного часу і підвищення точності механооброблення в сучасному обладнанні досягають пришвидшеними неробочими переміщеннями елементів верстатів на високих швидкостях під час досягнення точності зупинення і позиціонування в межах 0,1 мкм, скороченням кількості переустанов і операцій, обробленням деталей за одну установку (токарні обробні центри, токарно-фрезерні, фрезерно-свердлильні багатоопераційні верстати з ЧПК тощо).

3.1.1. Динамічна якість фрезерного верстату з ЧПК

Для попередньої оцінки динамічної якості верстатів і оцінки можливості їх подальшого переоснащення можна використати розроблений метод прискореного дослідження динамічних характеристик пружної системи верстата за її імпульсним збудженням. Цей метод, розроблений початково для зубофрезерних верстатів, робочі процеси в яких перебігають в умовах високих ударних навантажень, періодичного нерівномірного різання і збурення від зовнішніх і внутрішніх чинників, можна застосовувати також для інших типів верстатів, зокрема токарних і шліфувальних, в яких на високих швидкостях також виникають інтенсивні коливання і вібрації.

Суть цього методу полягає в тому, що пружні контури різального інструменту і заготовки збуджують одночасно прямокутним імпульсом з наступним спектральним аналізом вихідних сигналів. Збудження створюється під час розмикання системи у точці спряження підсистем інструменту і заготовки, а реакція цих підсистем на дію вхідного імпульсу фіксується у двох точках робочого простору верстата, що знаходяться у безпосередній близькості до ділянки, де створюється вхідна дія.

Для автоматизованого оброблення експериментальних даних розроблено комплект програм на основі математичного апарата теорії випадкових функцій, який дає змогу виявити резонансні частоти, знайти характеристики нормальних форм коливань верстата в широкому частотному діапазоні та встановити його динамічну характеристику. За умовою, покладеною в основу аналізу динамічних характеристик верстата, його пружну систему приймають лінійною. З цього випливає, що граничні переміщення у них дорівнюють сумі максимальних переміщень на кожній із власних частот, а передавальна функція системи визначається сумою передавальних функцій коливних ланок. Імпульсне збудження пружної системи верстата однократним короткотривалим ударом створює

прямокутний імпульс. Такий імпульс є широкополосним, має рівномірний спектр у широкому діапазоні частот. При достатній інтенсивності імпульсу відбувається його спектральний розклад та збудження пружної просторової системи на власних частотах.

Реакцію багатомасової просторової системи верстата, яка є результатом інтегрального ефекту у вигляді загасаючих коливань, записуємо окремо на осях інструменту 1 і деталі 2 (рис. 3.2). Спектри вихідних сигналів включають усі власні частоти пружної системи і характеризують її динамічні властивості. Завдяки малій тривалості імпульсу порівняно з часом вільних коливань можлива оцінка динамічних характеристик системи лише на основі вимірювання і аналізу реакції системи на виході. Оскільки на цьому етапі досліджень ставиться завдання дослідити можливість переходу на вищі робочі режими, тобто дати відповідь у вигляді “такні”, то не важливо, скількома і якими саме масами зумовлений резонанс, а значить, немає потреби в ототожненні окремих гармонічних складових із елементами системи, рухомими з'єднаннями, а також у встановленні форм цих коливань. У розробленому методі визначення динамічної якості верстата та записування коливань здійснювали за допомогою вібровимірної системи (рис. 3.1), у складі якої прилад VIBROTEST SCHENCK, 16-тирозрядний аналого-цифровий перетворювач сигналів ES-1868, вібраційні датчі VS-080 та комп'ютер.

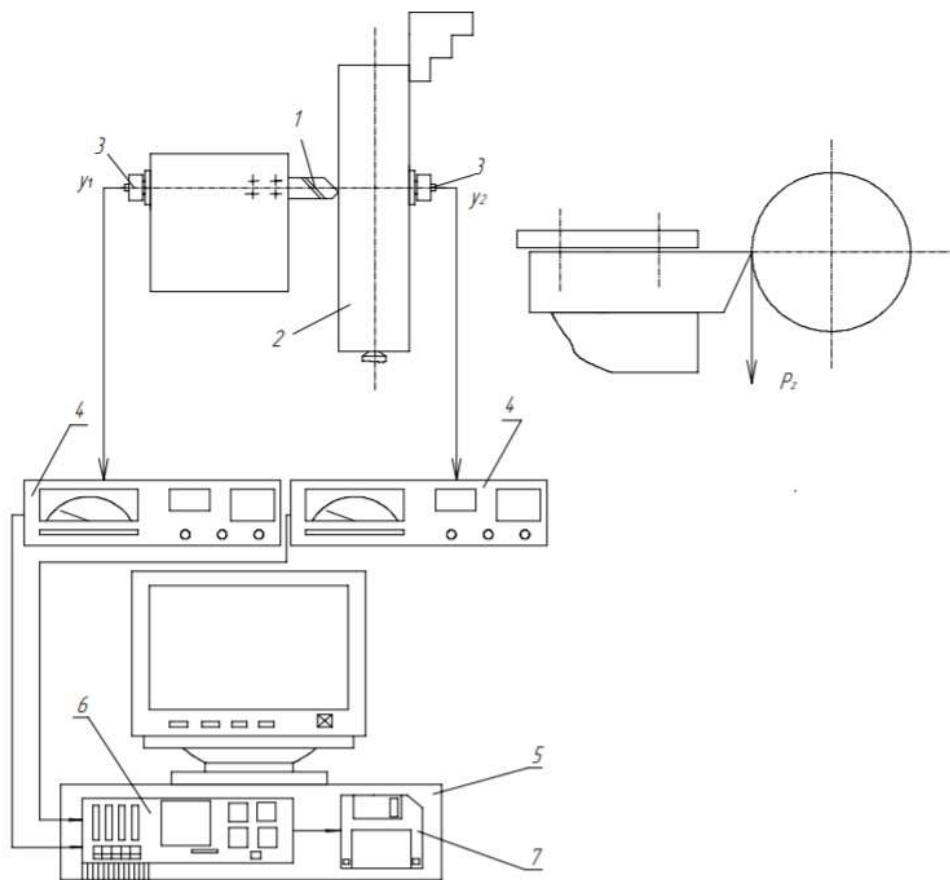


Рис. 3.1. Схема вимірювання коливань у робочій зоні токарного верстата

Де : 1 – різець; 2 – заготовки; 3 –здавачі (первинні перетворювачі сигналів); 4 – прилад VIBROTEST 30; 5 – PC; 6 – аналого-цифровий перетворювач сигналів; 7 – твердий диск комп'ютера.

Коливання u_1 , u_2 фіксували одночасно по двох каналах. Збудження в системі необхідно створювати ударом у напрямку головної складової сили різання P_z . Для описування нестационарних процесів, якими є реалізації вихідних коливань, використана модель локально-стаціонарного випадкового процесу з вибором ділянок, на яких сигнал зберігає ознаки стаціонарності [155]; бажано кілька кратно дублювання експерименту та усереднення по всіх реалізаціях. Сигнали на ділянках локальної стаціонарності обробляють автоматизовано за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, [156], яке дає змогу розкласти сигнали у ряд Фур'є, розраховувати постійні складові, комплексні амплітуди і фази окремих гармонік, здійснювати статистичний аналіз результатів на основі положень теорії випадкових функцій. Частота дискретизації вихідного сигналу – 11025 Гц, інтервал квантування амплітуди – 10-4 мкм. Р z у 1 у 2 1 2 4 4 3 3 5 6 7

У спектрах вихідних сигналів можна виділити обмежену кількість коливань з найбільшими амплітудами, які істотно відрізняються від інших складових спектра. Частоти, на яких спектральна густина має пікові значення, можна вважати власними, або близькими до власних частот пружної системи. Ці частоти відповідають нормальним формам коливань елементів верстата і є визначальними для його динамічної характеристики.

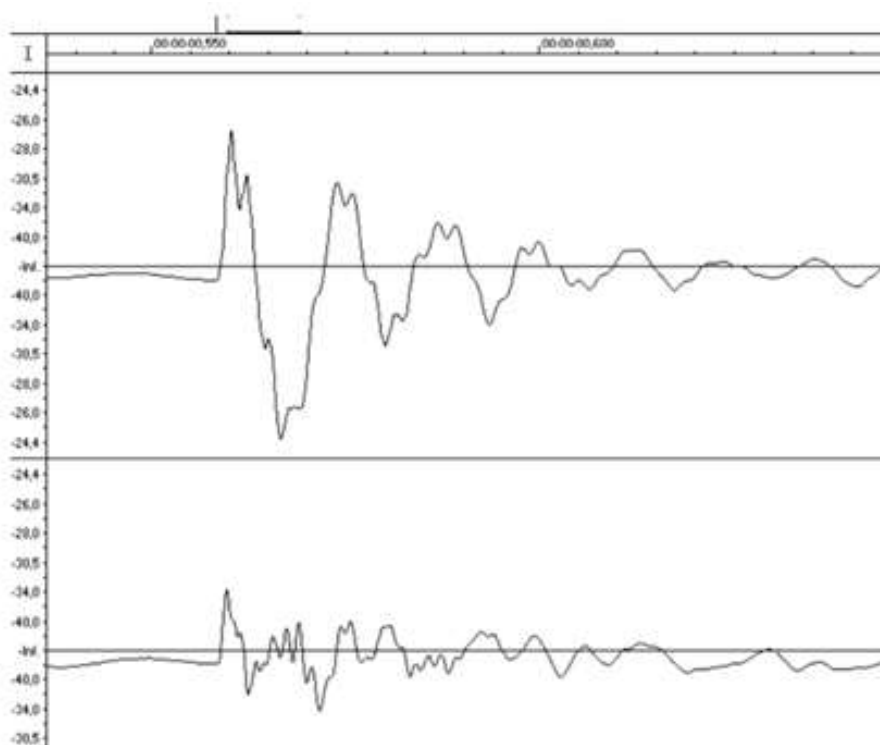


Рис. 3.2. Загасаючі вихідні сигналів у ланцюгах інструмента і заготовки зубофрезерного верстату

Для прикладу на рис. 3.2 показано вихідні коливання на осях заготовки і фрези зубофрезерного верстата мод. 5К32 від однократного імпульсного збудження, а на рис. 3.3

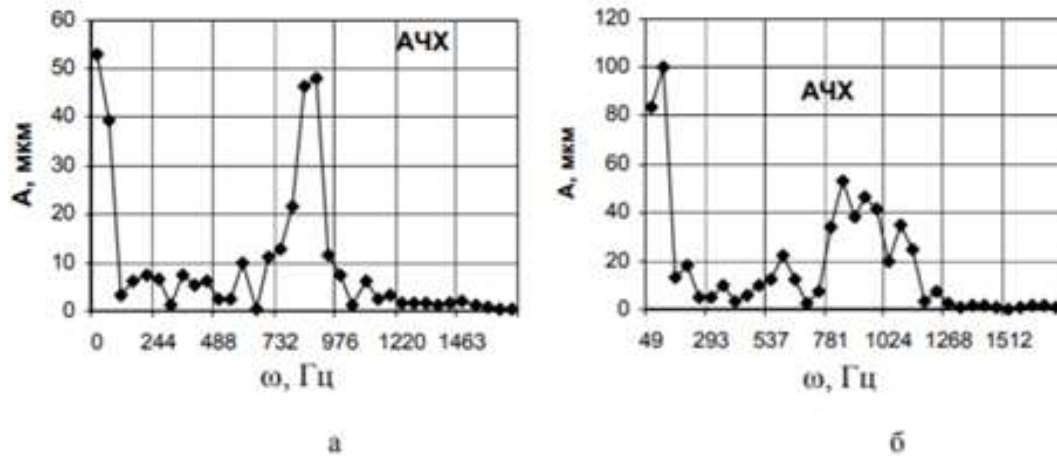


Рис. 3.3. Амплітудно-частотні характеристики спектра вихідних сигналів на осях заготовки (а) та інструмента (б) зубофрезерного верстату – усереднені амплітудночастотні і фазочастотні характеристики.

Розподіл по частотах енергії коливних процесів на осях інструмента і заготовки характеризує спектральна густина відносних коливань на виході пружної системи (рис. 3.4). Цей графік показує, що найінтенсивніші коливання в цьому верстаті виникають на власних частотах у діапазоні від 10 до 150 Гц. Отже, при роботі верстата на частотах, значення яких близькі до вказаних, можлива втрата сталості. Зокрема, інтенсивних коливань можна очікувати на частотах, близьких до 878 Гц, оскільки елементи з такою

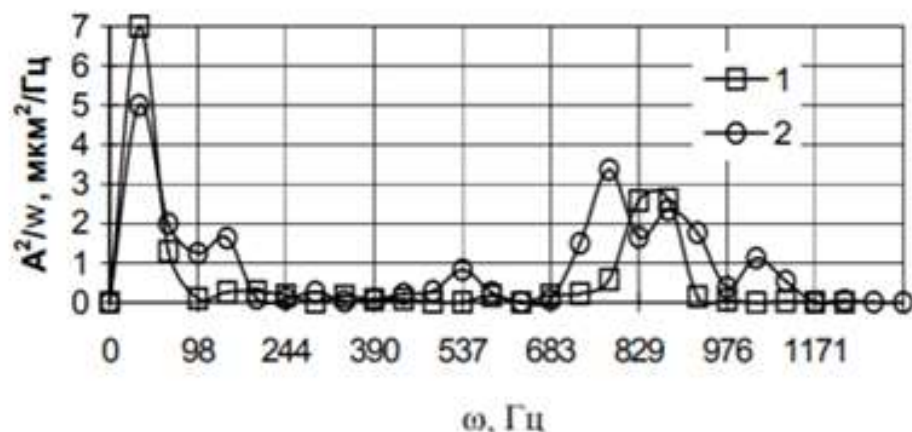


Рис. 3.4. Спектральна густина коливань у контурах інструмента (1) і заготовки (2) власною частотою є в обох гілках верстата.

За отриманими експериментальними даними, у цьому випадку, складну багатомасову пружну систему зубофрезерного верстата можна подати домінуючою коливною системою з 11 ступенів вільності. На наступному етапі робіт необхідно з'ясувати, які саме елементи верстата є джерелом підвищених коливань та розробити заходи для зменшення їх віброактивності під час роботи на інтенсивних режимах, щоб усунути можливі резонанси.

Наведений метод простий у виконанні, не вимагає складної і дорогої апаратури, забезпечений відповідними програмами. Мінімальні обсяги дослідного матеріалу у поєднанні з високою інформативністю, технічна простота і використання звичайної вібровимірної апаратури, автоматизоване фіксування та оброблення експериментальних даних за допомогою комп'ютера допомагають звести до мінімуму затрати часу, зменшити працемісткість досліджень та використовувати цей метод у виробничих умовах. Результати досліджень на підставі цього методу дають можливість виявити можливості й напрямки модернізації верстатів для їх переведення на функціонування в режимі швидкісного оброблення різанням.

3.2. Умови появи похибки

3.2.1. Динамічна похибка верстату

Одним з головних факторів впливу на точність обробки є динамічна накопичена похибка. Систематичні та випадкові складові загальної похибки обробки. Для досягнення точності при механічній обробці виникає питання: «який ступінь відповідності обробленої деталі її вірному прототипу або зразку?».

Чим більша відповідність, тим вища точність. Аналогічне, але більш чітке визначення приведено в технічній літературі.

Точність обробки – ступінь наближення дійсних значень геометричних параметрів оброблених деталей до заданих величин. Точність характеризується похибкою, яка визначається різницею між дійсним та заданим або розрахованим значенням параметра [26].

Саму ж похибку визначають як сукупну похибку обробленої деталі – результат впливу на процес обробки багатьох факторів, що викликають елементарні похибки обробки [26].

Похибка обробленої деталі складається:

1. Специфічні властивості динамічної системи верстата у процесі обробки
 - деформативність системи пружної технологічної системи ВПД;
 - динамічні характеристики робочих процесів у верстаті; - ступінь стійкості замкненої динамічної системи верстата;
2. Похибки базових поверхонь заготовки та похибки її встановлення на верстаті;

3. Деформації заготовки та інших елементів технологічної системи під впливом зусиль закріплення;
4. Розмірний знос ріжучого інструмента;
5. Похибки настроювання верстата;
6. Геометричні похибки верстата;
7. Похибки способу формоутворення;
8. Похибки виготовлення та встановлення інструменту;
9. Теплові деформації ланок технологічної системи під впливом зовнішніх та внутрішніх теплових полів [26].

Кожний з відповідно перелічених пунктів є небажаною складовою в процесі обробки, тому ми повинні або зменшити кількість наявних помилок або їх контролювати, щоб оброблена деталь з їх урахуванням відповідала заданим вимогам. Ряд факторів є незмінним у процесі обробки, такі як:

- деформації заготовки та елементів технологічної системи під впливом зусиль закріплення;
- похибки базових поверхонь заготовки та встановлення її на верстаті; Точність та випробування верстатів
- похибки виготовлення та встановлення інструмента;
- геометричні похибки верстата.

Інші фактори суттєво змінюються у процесі обробки під впливом змінних зусиль, змінної жорсткості, зміни температурних умов, зміни параметрів процесів різання, тертя.

Похибка, що виникає в результаті внутрішніх коливань верстату та його механізмів називається динамічною похибкою. Вона головним чином є індивідуальною для кожного верстату, тому було введено ряд спрощень і обмежень в швидкостях приводів верстату, для її контролю.

Похибки обробки – можуть утримувати систематичні та випадкові складові.

Фактори систематичних похибок обробки – геометричні похибки верстата.

Під час обробки деталей, що обертаються:

- непаралельність осі обертання і траєкторії руху інструменту викликає конусність;
- перекис – гіперболоїдальність обробленої поверхні.

Нерівномірна за кутом повороту жорсткість шпинделя викликає систематичну складову похибки форми поперечного перерізу деталі. У той же час багато з діючих факторів, а також їх сукупності, призводять до появи випадкових похибок. Вони проявляються у розсіянні параметрів точності обробки.

Особливість проявлення причин випадкових похибок в тому, що вони не піддаються точному прогнозуванню і проявляють свою дію незалежно одна від одної.

Фактори випадкових похибок:

- коливання твердості матеріалу заготовки;
- коливання припуску;
- коливання положення заготовки через неякісне базування;
- коливання температурного режиму;
- коливання заготовки відносно інструменту внаслідок динамічних процесів у верстаті, а також затуплення інструменту [26].

В результаті дії випадкових факторів дійсні розміри кожної деталі є випадковими величинами безперервного типу, оскільки приймають будь-які значення в межах визначеного інтервалу [26].

Похибка за динамічною складовою буде мати систематичні складові з використанням старої траєкторії руху, це є добре, бо задача контролю її буде проста.

Ввівши новий параметр оптимізації за динамічною складовою, постає проблема контролю динамічної похибки. При використанні оптимізованої траєкторії холостого руху верстату динамічна похибка не перевищить критичні значення та не має прямих кутів, що формують коливальну складову системи.

3.3. Способи уникнути динамічних похибок

Для фрезерних верстатів найбільш складною буде задача – отримання правильної форми площини вздовж поздовжньої подачі.

Джерела відхилення від площинності:

- геометричні похибки рухів вузлів верстата;
- неточність встановлення та кріплення верстата на фундаменті;
- теплові деформації;
- деформації від робочих зусиль у процесі різання;
- нерівномірність припуску.

Відомо, що змінюючи режими різання під час обробки з поздовжньою подачею можна отримати відхилення від площинності як в сторону опуклості, так і в сторону увігнутості.

Для $t = 0,1$ мм \rightarrow створюється опуклість величиною 0,01 мм;

Для $t = 0,5$ мм \rightarrow створюється опуклість величиною до 0,005 мм;

Для $t = 1$ мм \rightarrow створюється опуклість величиною до 0,0005 мм;

Для $t = 4$ мм \rightarrow створюється увігнутість величиною 0,03 мм.

Під час переміщення столу від середнього положення в обидві сторони без обробки виникає кінематична похибка, пов'язана з геометричними похибками та пружними

деформаціями у рухомих з'єднаннях. Зміна відстані від шпинделя (осі, горизонтального або вертикального торця) до поверхні столу складає до 20 мкм. При контурному фрезеруванні на верстатах з ЧПК домінуючий вплив на точність мають пружні деформації (40...60%). Жорсткість вздовж координатних осей може відрізнятись у 2...3 рази.

3.4. Аналіз попередньо побудованої простої траєкторії

Як і будь-яке дослідження оптимізації потрібно почати з аналізу попередніх результатів, виокремлення їх недоліків та вирішення проблем, що постають. При формоутворенні складних поверхонь використовують кінцеві, сферо-циліндричні і конічні фрези. При використанні багатоцільових верстатів час, що витрачається на зміну інструментів і переходи від однієї зони обробки до іншого, близькі за часом з процесом різання.

Завдання мінімізації холостих переміщень при фрезеруванні деталей складної форми на багатоцільових верстатах дуже актуальна, тому що рішення її дозволяє підвищити продуктивність дороговартісного технологічного обладнання, скоротити загальний час обробки, значно зменшити виробничі витрати.

Основним завданням пристроїв ЧПК є задання та відтворення певної просторової траєкторією. Тому *спосіб завдання і відтворення траєкторії (вид управління)* є другою за важливістю класифікаційною ознакою систем ЧПК.

Відповідно до цього можна виділити пристрої, що забезпечують:

- циклове управління – траєкторія задається номерами точок у просторі;
- позиційне управління – траєкторія задається номерами і координатами точок у просторі;
- контурне управління – траєкторія задається просторовою кривою.

Контурні СЧПК забезпечують безперервне управління робочими органами відповідно до заданих законів зміни їх шляху і швидкості переміщення для отримання необхідного контуру обробки. При контурній обробці інструмент рухається відносно заготовки по криволінійній траєкторії, яка утворюється у результаті додавання рухів за двома (плоска криволінійна траєкторія) або трьома (просторова криволінійна траєкторія) прямолінійними координатами. Такі СЧПК використовують в токарних і фрезерних верстатах, при виготовленні деталей з фасонними поверхнями. Подача (S) інструменту в кожен момент обробки складається з поперечної ($S_n < i_n$) і поздовжньої (S_{np}) подач. Таким чином, переміщення інструменту з різними координатними осями, функціонально пов'язаними одна з другою.

У нашому випадку розглянемо контурну систему управління. У програмному забезпеченні, створеному на базі досліджень, буде автоматично будуватися траєкторія (контур), яка буде перетворюватися в керуючий код верстата з ЧПК.

Для проведення порівняльних досліджень, було створено завдання:

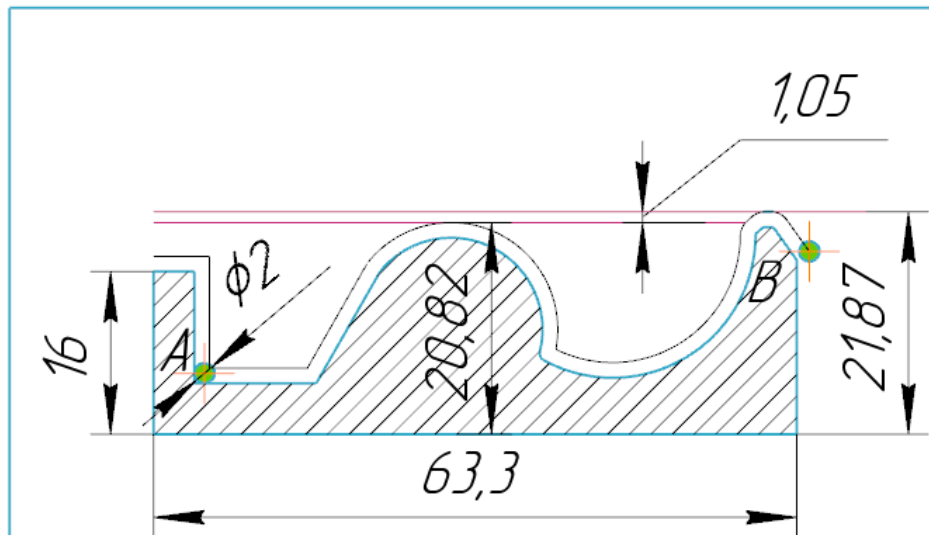


Рис. 3.5. Площина заготовки побудованого завдання

Завдання переміститись з точки «А» у точку «В», найкоротшим шляхом та за найменший час, оминаючи площину безпеки.

Найпростішим способом переміщення є рух за прямими, оскільки він виконується виключно за прямою та описує прості геометричні фігури, ним користувались при ручному керуванні верстатом. Даний метод мінімізує зіткнення з поверхнею заготовки або оснастки, але є значною мірою довгим.

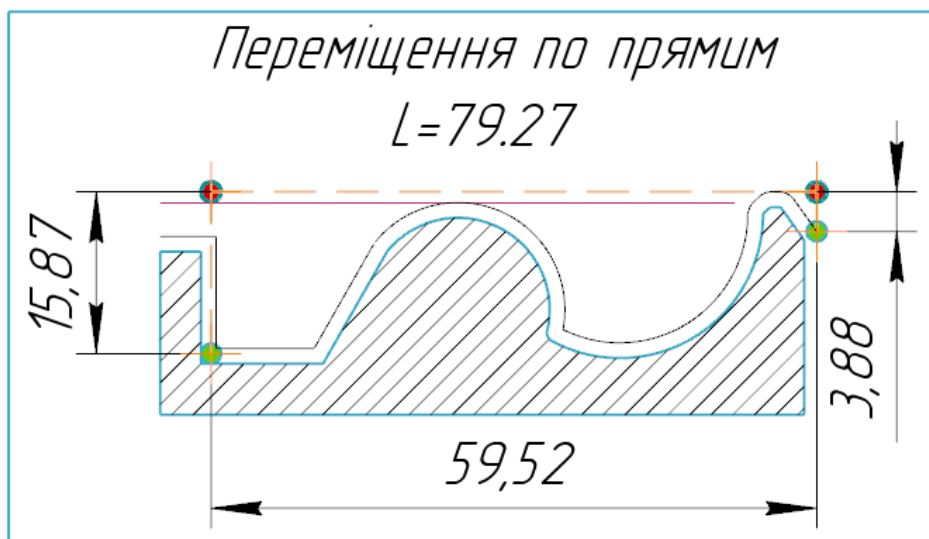


Рис. 3.6. Переміщення за прямими

Використовуючи даний метод ми проходимо за лінією найвищого піку, що обумовлюється найвищою точкою заготовки або оснастки з додаванням площини безпеки. Усі переходи виконуються під прямим кутом без використання скруглень. Прорахувати дану траєкторію можна і вручну, писати керуючу програму можна на самому верстаті без використання будь-яких допоміжних програм.

Головними проблемами даної траєкторії є:

- довжина траєкторії;
- час необхідний для її обходу виходячи з довжини та максимально- допустимої швидкості за динамічними параметрами стійкості обробляючої системи;
- виникаючий кут в 90° у траєкторії, що є небажаним явищем виходячи з динамічних умов стабільності верстату під час обробки;
- швидке зношення приводів верстату за умови постійного обходу з використанням прямого кута, зменшення точності верстату;
- необхідність доволі часто проводити обслуговування та налагоджування обладнання виходячи з динамічних помилок.

Перевагами даної траєкторії є:

- Безумовна простота;

Побудова траєкторії ґрунтується на елементарних прямих, що дає змогу писати програму вручну і дуже швидко

- Малий відсоток помилок та неможливість небажаного зіткнення;

Простота надає можливість швидко перевіряти програму, а в процесі обробки оператор може заздалегідь побачити можливе зіткнення.

3.5. Усунення недоліків попередньо побудованої простої траєкторії холостого руху інструменту на верстаті з ЧПК

З появою сучасних CAD програм стало можливим швидко побудова еквідистанти. При цьому потрібно вибрати площину заготовки і оснастки і вибрати відстань, на яку повинна зміститися траєкторія відносно них.

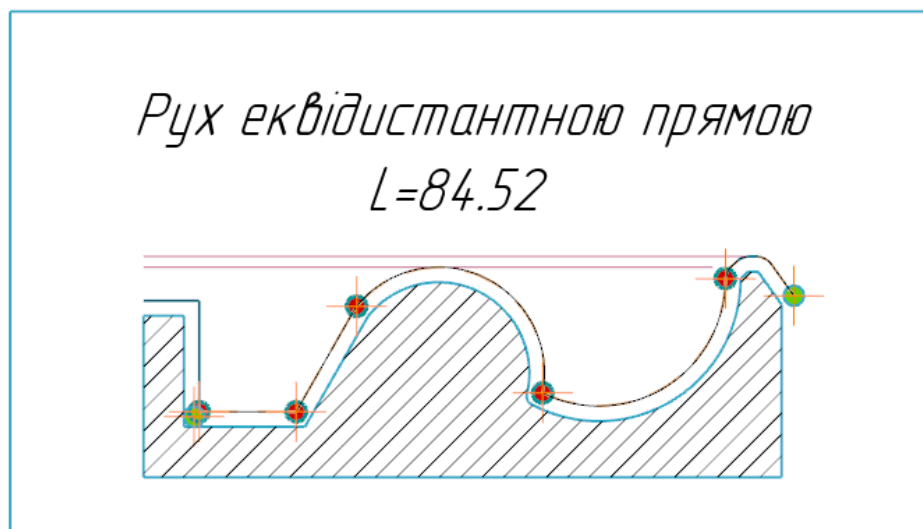


Рис. 3.7. Рух еквідистантною прямою

Як видно з рис. 3.7, площину безпеки збігається з побудованою еквідистантою, оскільки рівняння їх побудови однакові, а головною умовою є мінімальна відстань переміщення як щодо заготовки та оснащення, так і відстань пройденого інструментом шляху.

Але при даній побудові траєкторія стала ще довшою за рахунок складності поверхні і необхідності обходу широких поверхонь за дугою. Щоб спростити траєкторію було прийнято рішення пройти за контрольними точками, що являють собою пікові вершини з врахуванням площини безпеки.

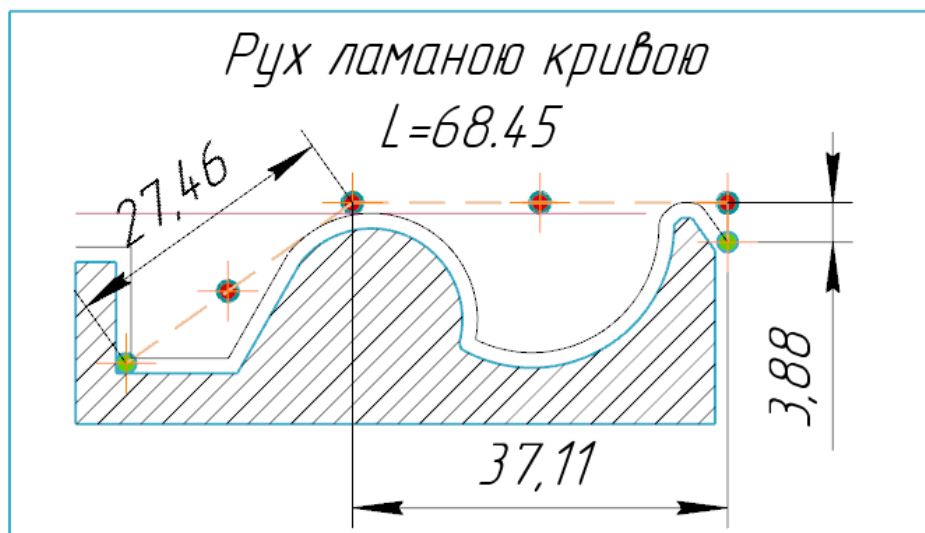


Рис. 3.8. Рух ламаною кривою

Рух прямими розташованими під кутом 90 градусів є нетехнологічним, оскільки приводи верстату не можуть миттєво змінити напрям на великих швидкостях, тому для ЧПК було прийнято скруглення при переходах і обходах, найпростішим видом скруглення є сплайнові побудови.



Рис. 3.9. Рух з сплайновим скругленням через контрольні точки

Але через структуру побудову ввігнутих прямих є небезпека контакту з оснасткою або заготовкою. Тому використовуючи криву Безьє можемо побудувати аналог тільки з ввігнутою траєкторією.

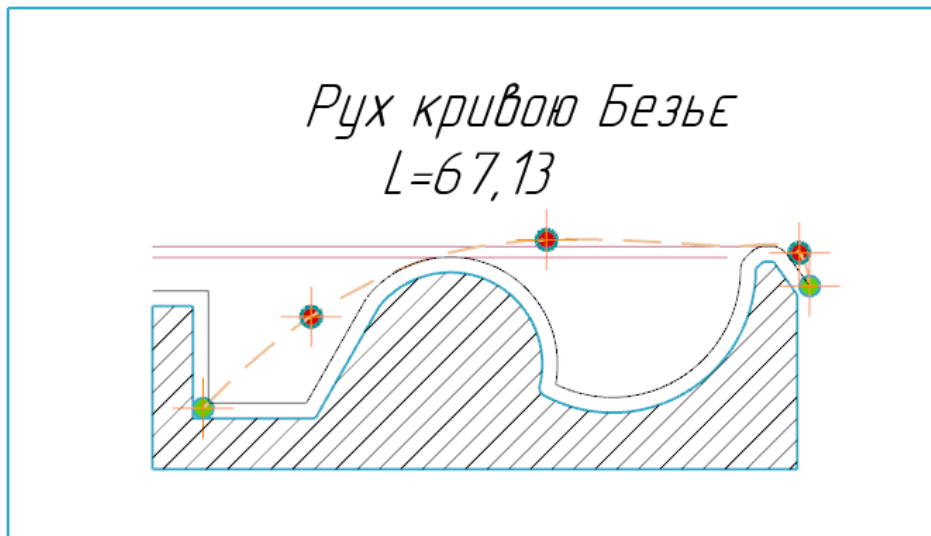


Рис. 3.10. Рух за кривою Безьє

Використовуючи постійні контрольні точки, та різні методи побудови траєкторії, визначили, що оптимальною є побудова кривої Безьє, оскільки саме вона має найкоротшу траєкторію, що відповідає поставленій задачі. Але аналізуючи отриманні траєкторії виникають сумніви, оскільки на деяких ділянках траєкторії більш доцільно рухатись прямою, саме тому було виконано ряд допоміжних побудов, і отримано наступні результати.

Поеднавши криву Безьє та пряму ми отримали прогнозовану довжину $L=66.3$ та критерій опуклості, згідно якого ми віддаляємось від критичних поверхонь.



Рис. 3.11. Рух за комбінованою кривою, отриманою шляхом поєднання кривої Безьє та прямої

Беззаперечними перевагами є коротка довжина траєкторії та критерій опуклості, згідно якого унеможлиблюється перетин з геометрією оснастки та заготовки. Складно розрахувати коли саме необхідно перейти від кривої Безьє до прямої, необхідно аналізувати для кожного можливого випадку.

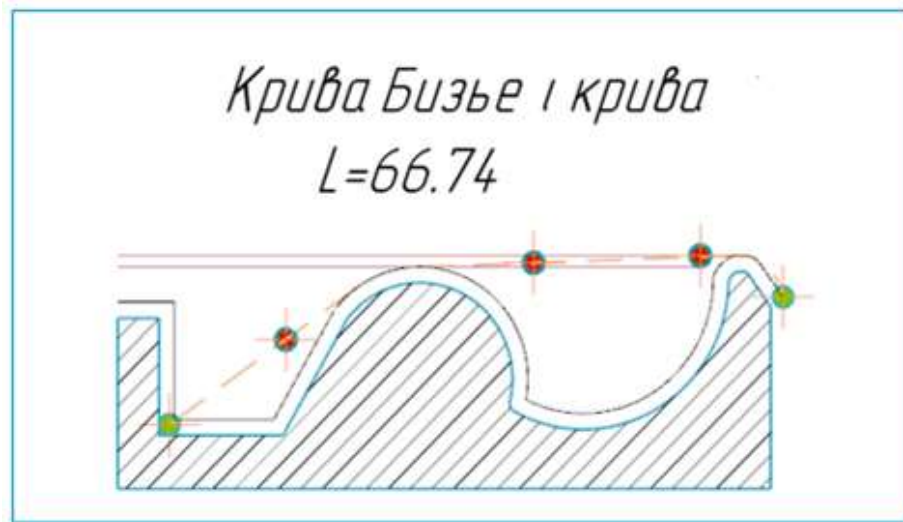


Рис. 3.12. Рух за комбінованою кривою, отриманою шляхом поєднання кривої Безьє та кривої

Отримана таким чином траєкторія характеризується переходами за кривою по контрольним точкам та використання кривої Безьє для їх з'єднання. Завдяки неоднорідності параметрів кривої Безьє отримаємо критерій впуклості, що ставить під питання надійність траєкторії, оскільки без попередньої перевірки можливий перетин з геометрією оснастки та заготовки. Простота побудови, оскільки елементи підходу і відходу описуються дугою, а через відомі точки, їх початку та кінця, будується крива Безьє. Також отримана довжина $L=66.74$ не є найкоротшою, що знову ставить під питання доцільність її використання.



Рис. 3.13. Рух за комбінованою кривою, отриманою шляхом поєднання дуги та прямої

Беззаперечними перевагами отриманої траєкторії є простота геометрії, побудова елементарними геометричними побудовами. Недоліком же буде отримана довжина, що є

найгіршим варіантом поєднання. Забезпечення динамічної стійкості гарантоване, оскільки для цього вже використовують скруглення траєкторій.



Рис. 3.14. Рух за комбінованою кривою, отриманою шляхом поєднання сплайна та прямої

Отримані результати шляхом поєднання сплайн та прямої, будуть подібні до результатів поєднання кривої Безьє та прямої, оскільки крива Безьє є одним з варіантів отримання сплайна, але має чітко регламентовані точки та значення кривизни. Беззаперечними перевагами є коротка довжина траєкторії та критерій опуклості, згідно якого унеможлиблюється перетин з геометрією оснастки та заготовки. Складно розрахувати коли саме необхідно перейти від сплайну до прямої, необхідно аналізувати для кожного можливого випадку.

Виходячи з аналізу додаткових побудов, знову бачимо, що крива Безьє показує кращий варіант. Тому доцільно використовувати саме комбінований метод у програмному забезпеченні, що буде розроблятися на основі даних досліджень.

ВИСНОВКИ

Рух по прямим розташованим під кутом 90 градусів є нетехнологічним, оскільки приводи верстату не можуть миттєво змінити напрям на великих швидкостях, тому для ЧПК було прийнято скруглення траєкторії при переходах і обходах. Найпростішим видом скруглення є сплайнові побудови, але через структуру побудови ввігнутих прямих є небезпека контакту з оснасткою або заготовкою. Тому використовуючи криву Безьє можемо побудувати траєкторію тільки з ввігнутою характеристикою. Дослідним шляхом, а саме побудовою траєкторії в програмному продукті Компас 2018, були виконані виміри довжин, та була визначена оптимальна траєкторія, а саме сполученням кривої Безьє та прямої [8], [9].

Під час модернізування металорізальних верстатів для переходу на режими високошвидкісного оброблення на першому етапі необхідно здійснити техніко-економічні розрахунки ефективності інвестицій в переоснащення обладнання і спорядження. Щоб цей захід не був формальним і не став лише даниною новітній тенденції, а призвів до реального покращання, необхідно врахувати якомога більше факторів як економічного, так і технічного і технологічного плану: нову продуктивність обладнання, очікувані технологічну собівартість, приведені витрати, прогнозований економічний ефект, підвищення якості оброблення тощо. Якщо попередній аналіз засвідчить можливість досягнення позитивного результату, то на наступному етапі реалізації цієї мети здійснюють заходи щодо модернізації металорізальних верстатів. Вирішальними факторами слугують технічний стан обладнання, геометрична точність, статична жорсткість і динамічна характеристика (“динамічна жорсткість”). У низці технічних проблем, які треба вирішити технічним службам підприємства, першочерговим завданням є підвищення частоти обертання шпинделя з 1000–1200 хв⁻¹ до набагато вищих значень. Як свідчить досвід таких робіт, реально при цьому вдається досягти максимальної частоти обертання шпинделя не вище 4000–5000 хв⁻¹. Хоча це ще не відповідає умовам HSC/HSM, проте і тут вже виникають проблеми у забезпеченні відповідних динамічних параметрів верстатів, їх шпиндельних вузлів, шліфувальних бабок, зубофрезерних супортів, приводів і передач, підвищення жорсткості вузлів, жорсткості та міцності різальних інструментів, точності оброблення у разі переходу на вищі робочі режими. Окрема проблема – вибір мастильно-охолоджувальних середовищ для ефективної роботи на втричі, вп’ятеро разів вищих швидкостях різання, за яких рідина перетворюється в аерозоль і втрачає первинні властивості. Такі проблеми актуальні насамперед для токарних, шліфувальних, зубообробних верстатів.

4. ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО ТРАЄКТОРІЙ ЗГІДНО ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ ТА РОЗРАХУНКІВ

4.1. Складові для ефективності впроваджених траєкторій у виробництво

Запропоновані мною траєкторії холостого руху для верстатів з ЧПК, можуть принести економічну вигоду лише у випадку постійного завантаження обладнання, дороговартісного часу роботи верстату та у випадку великої кількості холостих переходів (зазвичай при чистовій обробці). Для випадків малосерійного виробництва, та виготовлення не складних за формою деталей отримати спрогнозовану мною економічну вигоду не вийде.

Нижче приведена таблиця 4.1 техніко-економічних показників холостих рухів при виготовленні деталі на чистовому етапі виробництва.

Таблиця 4.1 - Техніко-економічні показники виготовленні холостих рухів при
виготовленні деталі на чистовому етапі виробництва

Метал	Кількість холостих переходів (шт.)	Довжина на прохід (м.)	Довжина загальна (м.)	Швидкість холостого переміщення верстату (м/хв)	Час на холостий перехід (хв.)
Сталь вуглецева	3000	2,5	7500	10-60	750-125
Сталь легована	3800	2,5	9500	10-60	950-158
Чавун сірий	2500	2,5	6250	10-60	625-104
Чавун ковкий	3500	2,5	8750	10-60	875-145

Наведені показники справедливі для умов сучасного виробництва на території України. Кожне підприємство спираючись на характеристики верстату та досвід персоналу, регламентує мінімальну та максимальну швидкість холостого переміщення верстату.

Спираючись на динамічну стабільність та характеристики верстату, використання більш високих швидкостей, без зміни траєкторії можуть порушити стабільність обробляючої системи, видавати похибку, або при критичному перебігу фрези може відбутися зіткнення з оснасткою або заготовкою.

Використавши хоча б одну з розрахованих траєкторій можна підвищити продуктивність роботи підприємства. Не кожна з наведених траєкторій може надати можливість для підвищення швидкості холостого руху верстату, тому будемо проводити розрахунки за регламентованою швидкістю холостого ходу 60м/хв, з відповідною зміною

довжини траєкторії. Розрахуємо зміни довжин наступним чином приймаємо рух за прямими за 100% і з них вираховуємо ефективність, відповідно на стільки потрібно зменшити загальну довжину холостого переміщення.

Розрахуємо за прямою пропорцією:

$$\begin{array}{ccc} \downarrow & A - 100\% & \downarrow \\ & B - X\% & \end{array} \quad (4.1)$$

Де «А» це довжина траєкторії холостого руху верстату за прямими, «В» - довжина отримана одним з методів, «Х» відповідний коефіцієнт ефективності методу «В». Провівши розрахунки отримаємо наступну таблицю з коефіцієнтами ефективності.

Таблиця 4.2 – Ефективність за довжиною та часом всіх наведених траєкторій

Вуглецева сталь	Коефіцієнт ефективності	Кількість холостих переходів (шт.)	Прогнозована довжина переходу (м.)	Довжина загальна (м.)	Швидкість холостого переміщення (м/хв)	Час на холостий перехід (хв.)
Прямими	1	3000	2,5	7500	60	125
Безьє та пряма	0,8363	3000	2,09075	6272,25	60	104,5375
Ламана	0,8635	3000	2,15875	6476,25	60	107,9375
Сплайн	0,8404	3000	2,101	6303	60	105,05
Безьє	0,8468	3000	2,117	6351	60	105,85
Безьє та крива	0,8419	3000	2,10475	6314,25	60	105,2375
Сплайн та пряма	0,8395	3000	2,09875	6296,25	60	104,9375

Із приведеної таблиці видно, що ефективність навіть без збільшення регламентованої швидкості холостого руху досягає 20%, значно скорочує допоміжний час.

Приймаємо, що до модернізації всі рухи відбувались за прямими. Якщо 125 хв. Допоміжного часу при обробці складної деталі це допоміжні (холості рухи) то отримаємо загальний час на обробку:

$$T_{\text{заг}} = T_{\text{доп}} + T_{\text{обр}} \quad (4.2)$$

$$T_{\text{доп}} = T_{\text{хол}} + T_{\text{нал}} \quad (4.3)$$

Враховуючи, що час на холості переміщення $T_{\text{хол}}$ складає до 90% допоміжного часу $T_{\text{доп}}$. Можемо розрахувати $T_{\text{доп}}$, а з нього і $T_{\text{заг}}$.

$$\begin{array}{ccc} \downarrow & T_{\text{доп}} - 100\% & \downarrow \\ & T_{\text{хол}} - 90\% & \end{array} \quad (4.4)$$

Звідси отримаємо рівняння:

$$T_{\text{доп}} = \frac{100 \times T_{\text{хол}}}{90} \quad (4.5)$$

В технічній літературі на допоміжні рухи верстату відводять від 40% до 50% часу, виходячи з цього можна спрогнозувати загальну ефективність на день, місяць та рік. Можемо скласти пропорцію та визначити приблизний загальний час ($T_{\text{заг}}$), що витрачається на виготовлення однієї деталі зі складною формою.

$$\begin{array}{ccc} & T_{\text{заг}} & - & 100\% \\ \downarrow & & & \downarrow \\ & T_{\text{доп}} & - & 40\% \end{array} \quad (4.6)$$

Звідси випливає, що $T_{\text{заг}}$ можна розрахувати за формулою:

$$T_{\text{заг}} = \frac{100 \times T_{\text{доп}}}{40} \quad (4.7)$$

Розрахуємо допоміжний час, загальний час та ефективність на день, місяць та рік для усіх випадків. Результати зведемо до таблиці.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунку часу обробки та ефекту на рік

Метод	Допоміжний час $T_{\text{доп}}$ (хв.)	Загальний час обробки $T_{\text{заг}}$ (хв.)	Ефективність за день	Ефективність місяць (30 днів)	Ефективність рік
Прямими	138,88	347,22	4,1472	124,416	1513,728
Безьє та пряма	116,15	290,38	4,958986	148,7696	<u>1810,03</u>
Ламана	119,93	299,82	4,802779	144,0834	1753,014
Сплайн	116,722	291,80	4,934793	148,0438	1801,199
Безьє	117,61	294,02	4,897496	146,9249	1787,586
Безьє та крива	116,93	292,32	4,926001	147,78	1797,99
Сплайн та пряма	116,59	291,49	4,940083	148,2025	1803,13

Із приведеної таблиці видно, що, без зміни траєкторії на оптимізовані варіанти в день можна випустити 4 деталі, при збереженні всіх нормативних годин. З використанням оптимізації можливо підвищити продуктивність до 5 деталей в день, що буде складати 300 деталей в рік, що складає 16,4% річної оптимізації. Тобто за такі самі витрачені гроші на виробництво і ресурси ми можемо випустити більше виробів і отримати надприбуток без втрати якості деталей. Дані розрахунки проведені за заниженими швидкостями холостих переміщень та з використанням середніх значень кількості переходів і їх довжин, в

кожному окремому випадку виготовлення потрібно провести індивідуальні розрахунки, що дасть можливість оптимізувати виробництво до 25-30%, без втрати якості та динамічної стійкості.

Зрозуміло, що при виготовленні значних за розмірами деталей (в промисловості є велика потреба у виготовленні складних за формою і розмірами цільними деталями) великих партій економічна ефективність може складати мільйони гривень.

4.2 Реалізація проекту виходу на ринок «Startup» проекту з продажу та підтримки програми автоматичної оптимізації траєкторії для фрезерних верстатів з ЧПК

Проект виходу на ринок проекту з продажу та підтримки програми автоматичної оптимізації траєкторії для фрезерних верстатів з ЧПК

Постановка проблеми: відкрити компанію, або філіал, яка буде створювати та в подальшому підтримувати програмний продукт для автоматичного розрахунку всіх можливих варіантів траєкторій, проводити аналіз, та виводити фінальний робочий керуючий код.

Маркетингове дослідження.

- Так як технологія є новаторською, тому на ринку поки нема пропозицій продажу програмних продуктів даного напрямку.
- Можна оцінити економічну вигоду при попередньому прорахунку (без врахування витрат на сам процес виготовлення) процесу різання з аналізом попередньої траєкторії та з можливістю широкого вибору варіантів для користувача.
- Для більш швидкого запровадження у виробництво потрібно працювати спільно з виробником верстатного обладнання та пропонувати даний продукт як опцію до певного верстату з можливим розширенням нумератури підтримуваного обладнання.
- Створити просту та уніфіковану систему кодування, задля швидко та зрозумілого написання оптимального коду та легкої його перевірки.

Оцінка прибуткової вигоди

Для оцінки проводились розрахунки вартості річного виробництва з можливістю його збільшення без змін до верстатного обладнання та персоналу. Для виготовлення одного модернізованого комплексу, потрібен один трьохкоординатний фрезерний верстат з ЧПК з усіма відомими параметрами обладнання, готовий, попередньо напрацьований код, спеціаліст з налагодження та маркери оснастки.

Для програмування модернізованого коду необхідний один спеціаліст, заробітня плата якого без оподаткування 63 грн. за годину, а з урахуванням податку (+22%), приблизно матимемо 90 грн. 8 годинний робочий день дає: 720 гривень. Також необхідно платити або місячну плату за користування програми (з подальшою підтримкою та поясненнями), або покупка продукту з певним циклом оновлення на 2 роки.

Додаткові матеріали для виробництва: ~ 3000 грн.

Обчислювальний комплекс (наприклад, комп'ютер з високошвидкісною обчислювальною начинкою): ~ 25000-100000 грн.

Один пристрій вимірювання динамічних показників обробляючої системи: ~ 25000 грн.

Доступ до верстаного обладнання певного виробника (наприклад HAAS), доопрацювання коду для певного верстату за його індивідуальними характеристиками.

Бізнес план (таблиця 4.4)

Таблиця 4.4 – Час виконання по тижням

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Час на виконання, тижні													
2	Вид роботи	Відповідальний	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
3	Реєстрація юр. особи	Хасцька												
4	Оренда приміщення	Хасцька												
5	Ремонт приміщення	Хасцька												
6	Закупка устаткування	Хасцька												
7	Закупка матеріалів	Хасцька												
8	Налаштування виробництва	Хасцька												
9	Пробний період випуску продукції	Хасцька												
10														
11														
12														
13		Сума, USD	80	820	800	1000	500	800	1150	600	600	200	100	
14														
15														

Спочатку приміщення буде орендуватись, а з часом вивільнення грошей повністю викупиться.

Команда проекту: керівник підприємства, інженер по обладнанню, бухгалтер, завгосп, робітник.

Кошторис і час початку роботи.

По приблизним підрахункам кошторис складає $51000\$ + 30\%$ (накладні затрати) = 66 300 \$.

Орієнтовний час запуску підприємства: 11 тижнів.

Проект виходу на ринок проекту з продажу та підтримки програми автоматичної оптимізації траєкторії для фрезерних верстатів з ЧПК

Постановка проблеми.

Відкрити підприємство по виготовленню програмного продукту з створення додатку до існуючих продуктів або відокремленого забезпечення. Обрати виробника верстату який найбільш поширений поблизу від мого знаходження, та обладнання якого

використовується для обробки складних за формою деталей у великосерійному та масовому виробництві.

Маркетингове дослідження.

- Так як технологія є новаторською, тому на ринку поки нема пропозицій продажу зразків даного продукту.

- Можна оцінити економічну вигоду лише після першого місяцю роботи, оскільки першочергові витрати дуже великі. Але при наданні гнучкої системи оплати програми, заснування програми вигідного придбання продукту на довгостроковий період та надаючи гарантії і допомогу з налагодженням.

- Найбільш економічно і технічно доцільно пропонувати даний програмний продукт виробництвам військового напрямку та великосерійним виробництвам.

- Провести опитування та визначити верстатне обладнання першочергового налагодження.

- Передбачити рекламні події та пробний період для покупця.

- Вийти на закордонні ринки, розширивши можливі інвестиції.

Оцінка прибуткової вигоди.

Оцінку проводимо для одного запропонованого продукту з підпискою на 5 років. Покупець оплачує 50% в перший рік користування програмою. Ціна продукту на 5 років складає 10000\$ отже першим внеском отримаємо 5000\$.

Маючи скромний бюджет винаймаємо приміщення та наймаємо програміста ПО. Вже через 2 місяці маємо чорновий продукт, проводимо його доналагодження на виробництві. Вже через 6 місяців з моменту отримання 5000\$ надаємо продукт у використання, в цей час паралельно продаємо свої послуги іншим виробникам.

Витрати в місяць:

Оренда приміщення - 10000 грн.

Заробітна плата програмісту – 15000 грн.

Витрати на маркетинг – 5000 грн.

Витрати на устаткування - 5000грн.

Отже в місяць отримаємо витрат на 1000\$, таким чином наші кошти закінчаться вже за 5 місяців, тому необхідно проводити агресивний маркетинг, заключати фінансові угоди на довгостроковій основі, шукати інвесторів.

Бізнес план

Спочатку приміщення буде орендуватись, а з часом вивільнення грошей повністю викупиться (таблиці 4.5).

Команда проекту: керівник підприємства, інженер по обладнанню, бухгалтер, завгосп, робітник.

Таблиця 4.5 – Час на виконання по тижням

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1													
2	Вид роботи	Відповідальний	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	Регистрація юр. Особи	Корнійчук											
4	Оренда приміщення	Корнійчук											
5	Ремонт приміщення	Осипенко, ф. підрядник											
6	Закупка обладнання	Осипенко											
7	Закупка матеріалів	Осипенко											
8	Настройка виробництва	Осипенко											
9	Пробний період випуску продукції	Осипенко											
10													
11													
12													
13		Сума, USD	75	825	750	1000	500	800	1100	600	600	200	100
14													
15													
16													
17													
18													

Кошторис і час початку роботи.

По приблизним підрахункам кошторис складає 6550 USD + 30 % (непередбачувані затрати) = 8515 USD.

Орієнтовний час запуску підприємства: 11 тижнів.

4.3 Рекомендації по впровадженню технології оптимізації траєкторії холостого руху на фрезерних верстатах з ЧПК

Для впровадження розроблених технологій в різноманітних галузях виробництва необхідно здійснити наступні підготовчі техніко-економічні дії, а саме:

- враховуючи, що реалізація процесу отримання програмного продукту способом по традиційній схемі потребує значних коштів на придбання потужного обчислювального обладнання, необхідно ретельно провести аналіз існуючого керуючого коду з метою встановлення оптимального співвідношення «потужність – ціна»;
- необхідна розробка або придбання вже існуючої оснастки для реалізації сканування оброблюючої зони та створення маркерних міток;
- потрібне проектування або підбір компактної вимірювальної системи;
- слід виконати необхідні конструкторські розробки по інтегруванню вимірювального комплексу та систем зчитування;
- виходячи з необхідності синхронізації переміщень фрези та заготовки під час обробки, потрібно внести необхідне корегування програми руху координатного столу комплексу;

- необхідний підбір допоміжного обладнання та подальше його електронне керування;
- провести тестування програми з керуючим кодом в умовах реального виробництва з наступним усуненням недоліків;
- провести навчання персоналу виробника за окрему плату або за умовами контракту, для самостійного програмування та корегування оптимізації виробництва;
- знайти інвесторів, що зацікавлені в швидкому виході програмного продукту;
- гнучка структура компанії з взаємодією різними підрозділами як технічним так і аналітичним.

ВИСНОВКИ

Провівши економічний прорахунок запровадження даної технології оптимізації холостих рухів інструменту на верстатах з ЧПК, я дійшов висновку, що оптимізація на 20% є більш ніж задовільною. Якщо враховувати той факт, що оптимізація в 20% була досягнута без підвищення швидкості холостих переміщень верстату, без втрати динамічної стабільності оброблювальної системи можна сказати, що при більш детальному дослідженні можна досягти і 40-50% оптимізації, оскільки нова геометрія траєкторії руху інструменту може бути використана з більшою швидкістю.

Економічний ефект для виробництва буде, в залежності від випуску, габаритів та обраного верстатного обладнання буде змінюватись і економічний ефект. Одне лише можна сказати напевно, недоцільно запроваджувати дану технології в одиничне та малосерійне виробництво, оскільки час на підготовку та запуск може складати більш ніж отримана оптимізація.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Ґрунтуючись на відомій класифікації складних поверхонь, розглянувши обладнання, інструмент та софт-програми, що необхідні для формоутворення складних поверхонь шляхом фрезеруванням заготовки, сформовано перелік завдань, що були вирішені під час написання дисертації, щоб оптимізувати загальну стратегію обробки. Виходячи з вивчених та проведених раніше досліджень та експериментів, обираємо окрему стратегію обробки деталі: розбиття поверхні обробки на окремі ділянки, розв'язання задач для кожної ділянки, перевірка загального розв'язку задачі.

Розглянувши можливі варіанти загальної стратегії обробки деталі з складною поверхнею, для зменшення кількості варіантів, що підлягають аналізу визначимо критерій оптимізації, згідно до обраного методу розв'язку задачі визначимо оптимальну послідовність переходів інструменту від попередньої ділянки обробки до подальшої за основної умови, мінімізації холостих переміщень з урахуванням періоду стійкості інструменту.

Визнано, що рух по прямим розташованим під прямим кутом є нетехнологічним, оскільки приводи верстату не можуть миттєво змінити напрям на великих швидкостях, тому для ЧПК було прийнято скруглення траєкторії при переходах і обходах. Використовуючи криву Безьє можемо побудувати траєкторію тільки з ввігнутою характеристикою, а з поєднанням кривої з прямою отримали бездоганий за довжиною результат. Дослідним шляхом, а саме побудовою траєкторії в програмному продукті Компас 2018, були виконані виміри довжин, та була визначена оптимальна траєкторія, а саме сполученням кривої Безьє та прямої [8], [9].

Під час модернізування металорізальних верстатів для переходу на режими високошвидкісного оброблення здійснили техніко-економічні розрахунки ефективності інвестицій в переоснащення обладнання і спорядження. Попередній аналіз засвідчив можливість досягнення позитивного результату. На наступному етапі реалізації цієї мети здійснюють заходи щодо модернізації металорізальних верстатів. Вирішальними факторами слугують технічний стан обладнання, геометрична точність, статична жорсткість і динамічна характеристика ("динамічна жорсткість"). Хоча це ще не відповідає умовам HSC/HSM, проте і тут вже виникають проблеми у забезпеченні відповідних динамічних параметрів верстатів, їх шпиндельних вузлів, шліфувальних бабок, зубофрезерних супортів, приводів і передач, підвищення жорсткості вузлів, жорсткості та міцності різальних інструментів, точності оброблення у разі переходу на вищі робочі режими. Окрема проблема – вибір мастильно-охолоджувальних середовищ для ефективної роботи на втричі, вп'ятеро разів вищих швидкостях різання, за яких рідина

перетворюється в аерозоль і втрачає первинні властивості. Такі проблеми актуальні насамперед для токарних, шліфувальних, зубообробних верстатів.

Було виведено алгоритм програмного продукту, що повинен оптимізувати керуючий код.

1. Побудувати, такий алгоритм послідовності обробки ділянок x , який би одразу можна було застосувати на виробництві.
 - 1.1. Якщо такий варіант вже наявний на виробництві, використати вже наявний маршрут проаналізувавши його на критичні помилки.
2. Прийняти, що знайдений варіант x є найкращим можливим варіантом $x_b=x$, та, що міри методів руйнування/відновлення однакові $\rho^-(1, \dots, 1) \rho^+(1, \dots, 1)$.
3. Повторювати до тих пір, доки умова «стоп», не буде виконана.
 - 3.1. Руйнуємо всі прямі кути траєкторії.
 - 3.2. Відновити втрачені кути використавши один з методів апроксимації траєкторії.
 - 3.3. Оцінити прийнятність отриманого результату, перевірити траєкторію на критичні помилки та перетин зони безпеки.
 - 3.4. Проаналізувати допоміжний час для кожного з можливих варіантів, порівнювати допоміжний час та шлях, до тих пір поки варіант $x_t=x_{\min}$, або $t_t=t_{\min}$ не буде знайдено.
 - 3.5. Якщо виникає випадок $x_t=x_{\min}$, а $t_t \neq t_{\min}$ або $x_t \neq x_{\min}$, а $t_t=t_{\min}$ то записуємо обидва випадки для подальшого дослідження.
4. Повернутись до x_b .
 - 4.1. Якщо на виході буде отримано два результати вивести $x_{b(t)}$ - за часом $x_{b(x)}$ - за шляхом.
 - 4.2. Провести порівняння обох отриманих варіантів та визначити найбільш оптимальний з них.
5. Провести перевірку отриманого результату за динамічними характеристиками. Якщо результат незадовільний за можливістю допрацювати траєкторію. Якщо доопрацювання не допомогло/неможливе повторити кроки 1-4 виключивши попередньо отриманий результат з аналізу.
6. Прийняти до використання отриманий результат побудов. Розрахувати за ним ефективність оптимізації за: часом, шляхом, економією коштів, збільшення робочого часу до наступного технічного обслуговування.

Використавши алгоритм та наведені рекомендації, можливо створити успішний програмний продукт, та почати його продаж для підприємств країни та світу. Економічна доцільність та вигода приведена в четвертому розділі, прогнозована за найгірших умов роботи, надає впевненості в швидкому рості попиту та економічному рості підприємств-споживачів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Нгуен В. Н. Оптимизация холостых перемещений инструмента при фрезеровании сложных поверхностей на трехкоординатных станках с ЧПУ : дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Нгуен Ван Нам – Иркутск, 2015. – 134 с.
 2. Пономарев Б.Б., Репин В.М. Метод автоматического нахождения оптимальных параметров стратегий чистового фрезерования сложных деталей / Б.Б. Пономарев, В.М. Репин // Всероссийская научно-техническая конференция «Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве». Тезисы докладов. – В 19 частях. – Часть 2. – Нижний Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т, 1999. – С.11-14.
 3. Пономарев Б.Б., Репин В.М. Повышение производительности формообразования сложных деталей на фрезерных станках с ЧПУ / Б.Б. Пономарев, В.М. Репин // Вестник ИрГТУ, 1998. – № 3. – с.50-53.
 4. Пономарев Б.Б., Медведев Ф.В. Оптимизация границ чистового фрезерования деталей сложного профиля и художественных барельефов / Б.Б. Пономарев, Ф.В. Медведев // Повышение эффективности технологической подготовки машиностроительного производства: Сб. научн. тр. – Иркутск: Издво ИрГТУ – 2002. – С. 48-54.
 5. Пономарев Б.Б. Оптимизация стратегии фрезерования сложных поверхностей: Под ред А.И. Промптова / Б.Б. Пономарев. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003 – 239 с.
 6. Данилов В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. – Мн.: Наука и техника, 1995. – 264 с.
 7. Кравченко И. И. Анализ средств автоматизации программирования оборудования, оптимизация последовательности обработки поверхностей сложных корпусных деталей / И. И. Кравченко. // Машиностроение и компьютерные технологии.. – 2018. – №7. – С. 31–47.
 8. Мілевський В. В. Оптимізація холостих переміщень інструменту при обробці на верстатах з ЧПК / В. В. Мілевський, Ю. М. Малафєєв. // Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Вітчизняна наука на зламі епох: проблеми та перспективи розвитку». – 2018. – №46. – С. 475–479.
 9. Мілевський В. В. Оптимізація холостих і робочих переміщень інструменту / В. В. Мілевський, Ю. М. Малафєєв. // Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні». – 2019. – №1. – С. 356–362.
 10. Крива Безьє [Електронний ресурс] // МДПУ Вікіпедія | MDPU Wikipedia. – 2018.
- Режим доступу до ресурсу:

<http://wikiinfo.mdpu.org.ua/index.php?title=%D0%9A%D1%80%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D0%91%D0%B5%D0%B7%D1%8C%D1%94&oldid=239047>.

11. Особливості фрезерної обробки деталей з просторово-складними поверхнями [Електронний ресурс] // Погляд у майбутнє приладобудування №12. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27843>.

12. 3D Parts Milled with iMachining 3D + HSM [Електронний ресурс] // Solidcam. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.solidcam.com/hh/cam-megoldasok/cam-modulok/hsm-3d-nagysebessegu-megmunkalas/>.

13. Виды сложных поверхностей и их классификация [Електронний ресурс] // Технар. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://tehnar.net.ua/vidyi-slozhnyih-poverhnostey-i-ih-klassi/>.

14. Радзевич С.П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ / С.П. Радзевич. – К.: Выща шк., 1991. – 192 с.

15. HSR/HSM Modules for 3D High Speed Milling [Електронний ресурс] // Solidcam. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.solidcam.com/hh/cam-megoldasok/cam-modulok/hsm-3d-nagysebessegu-megmunkalas/>

16. NX (система автоматизированного проектирования) [Електронний ресурс] // Wikipedia. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: [https://ru.wikipedia.org/wiki/NX_\(система_автоматизированного_проектирования\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/NX_(система_автоматизированного_проектирования)).

17. Возможности SIEMENS NX [Електронний ресурс] // Siemens. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/nx/nx-for-manufacturing.html>.

18. Autodesk POWERMILL технические особенности [Електронний ресурс] // Поинт. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.pointcad.ru/product/autodesk-powermill/funkczional-autodesk-powermill#>.

19. Описание CAD/CAM-системы SolidCAM [Електронний ресурс] // Планета САМ. Сетевое издание ЭЛ № ФС 77 - 63083. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <http://planetacam.ru/choice/solidcam/>.

20. Описание CAD/CAM-системы CATIA [Електронний ресурс] // Планета САМ. Сетевое издание ЭЛ № ФС 77 - 63083. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <http://planetacam.ru/choice/catia/>.

21. Catia [Електронний ресурс] // Wikipedia. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/CATIA>.

22. Catia [Електронний ресурс] // Wikipedia. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/CATIA>.

23. Дружинский И.А. Методы обработки сложных поверхностей на металлорежущих станках / И.А. Дружинский. – М.: Машиностроение, 1965. – 600 с.
24. Дружинский И.А. Методы фрезерования пространственно-сложных поверхностей / И.А. Дружинский. – М.: Машгиз, 1950. – 128 с.
25. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник / И.А. Дружинский. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 263 с.
26. ТОЧНІСТЬ ТА ВИПРОБУВАННЯ ВЕРСТАТІВ [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://manzhilevskyu.vk.vntu.edu.ua/file/eaeb30da1b3438c05b5956e597e75bf0.pdf>.
27. ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ ДЛЯ ПЕРЕВЕДЕННЯ ЇХ НА РЕЖИМИ ШВИДКІСНОГО РІЗАННЯ [Електронний ресурс]. – 2007. – Режим доступу до ресурсу: http://vlp.com.ua/files/05_10.pdf.
28. Ефимов Н.В. Краткий курс аналитической геометрии / Н.В. Ефимов. – М., 1975. – 272 с.
29. Завьялов Ю.С. Сплайны в инженерной геометрии / Ю.С. Завьялов, В.А. Леус, В.А. Скорospelов. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
30. Зазерский Е.И., Жолнерчик С.И. Технология обработки деталей на станках 122 с программным управлением / Е.И. Зазерский, С.И. Жолнерчик. – Л., «Машиностроение», Ленингр. отд-ние, 1975. – 208 с.
31. Заранс И.Г., Прикшанс И.Г. Программное обеспечение машинной графики в САПР штампов / И.Г. Заранс, И.Г. Прикшанс // Автоматизация технической подготовки производства: сб. науч. трудов. – Рига: РПИ, 1983. – С. 98-103.
32. Зубов В.П., Абросимова М.А. Исследование влияния формы, размеров и ориентации концевой инструмента на точность обработки аэродинамических поверхностей моноколес компрессора / В.П. Зубов, М.А. Абросимова // Авиационная техника: Известия высш. учебн. завед-ий, 2000. – №4. – С. 68-74.
33. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Аналитическая геометрия: Серия: «Курс высшей математики и математической физики» / В.А. Ильин, Э.Г. Позняк. – М., 1981. – 232 с.
34. Инструмент для автоматизированного производства [Текст]: учебное пособие / под ред М.И. Юликов. – М.: ВЗМИ, 1980 – Вып. II: Конструкции и эксплуатации. – 110 с.
35. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И.Л. Фадюшин, Я.А. Музыкант, А.И. Мещеряков и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
36. Клещев Г.М., Проскурин Г.А., Тетерин Г.П. Система автоматизированного проектирования штампов: Экспересс-информация: Сер.: технология тракторного и

- сельскохозяйственного машиностроения / Г.М. Клещев, Г.А. Проскурин, Г.П. Тетерин. – М.: ЦНИИТЭИтракторосельмаш, 1982. – вып. 18 – С. 1-20.
37. Компьютерные технологии в науке, технике и образовании: Учеб. пособие / Под общ. ред. А.И. Промптова. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000 – 396 с.
38. Константинов М.Т. Расчет программ фрезерования на станках с ЧПУ / М.Т. Константинов. – М.: Машиностроение, 1985. – 160 с.
39. Корн Г., Корн Т.. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) [Текст]: Пер. с англ. / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Мир, 1982. – 680с.
40. Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Калинин М.А. Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении. Справочник технолога / А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков, М.А. Калинин. – М.: «Машиностроение», 1976. – 288 с.
41. Кузнецов Ю.Н. Станки с ЧПУ / Ю.Н. Кузнецов. – К.: Выща шк., 1991. – 278 с.
42. Кулик В.К. Прогрессивные процессы обработки фасонных поверхностей [Текст] / В.К. Кулик, Ю.В. Петраков, В.В. Иотов. – К. : Техника, 1987. – 176 с.
43. Макаров А.И. Оптимизация процессов обработки деталей сложной формы на фрезерных станках с ЧПУ: Автореф. дисс. на соиск-е учен. степ-и канд-а техн. наук / А.И. Макаров. – М.: МГТУ «МАМИ», 2002. – 24 с.
44. Медведев Ф.В. Создание художественных барельефов в программном пакете ArtCAM Pro / Ф.В. Медведев // Современные высокоэффективные технологии в машиностроении для различных отраслей промышленности: Сборник статей к семинару. – Иркутск, 2001. – с. 113-118.
45. Меламед И.И. Задача коммивояжера. Приближенные алгоритмы / И.И. Меламед, С.И. Сергеев, И.Х. Сигал // Автоматика и телемеханика. – 1989. – № 11. – С.3-26.
46. Петров А.И., Лутовинов А.П., Дегтярев Г.В. Разработка автоматизированной системы технологической подготовки кузнечноштаповочного производства / А.И. Петров, А.П. Лутовинов, Г.В. Дегтярев, М.А. Яхнис. – Кузнечно-штаповочное производство, 1977. – №12. – С. 13-18.
47. Петров А.И., Тарасов В.С., Девятериков А.Г. Автоматизированное проектирование технологии обработки материалов / А.И. Петров, В.С. Тарасов, А.Г. Девятериков // Ижевск: «Удмуртия», 1978. – С. 16-24.
48. Пожидаев М.С. Приближённые алгоритмы решения сбалансированной задачи к коммивояжёров / Ю.Л. Костюк, М.С. Пожидаев // Вестник ТГУ. УВТиИ, 2008. – № 1(2). – С. 106-112.
49. Позняк Э.Г., Шикин Е.В. Дифференциальная геометрия: Первое 124 знакомство / Э.Г. Позняк, Е.В. Шикин. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 384 с.

50. Пономарев Б.Б. Оптимизация стратегии фрезерования сложных поверхностей: Под ред А.И. Промптова / Б.Б. Пономарев. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003 – 239 с.
51. Пономарев Б.Б., Каневский И.Б. Определение параметров шероховатости сложных поверхностей с использованием цифровой фотографии / Б.Б. Пономарев, И.Б. Каневский // Сб. тр. международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века» в г. Севастополе 10-16 сентября 2001 г. – Донецк: ДонГТУ, 2001. – Т. 2. – С. 86-90.
52. Пономарев Б.Б., Медведев Ф.В. Оптимизация границ чистового фрезерования деталей сложного профиля и художественных барельефов / Б.Б. Пономарев, Ф.В. Медведев // Повышение эффективности технологической подготовки машиностроительного производства: Сб. научн. тр. – Иркутск: Издво ИрГТУ – 2002. – С. 48-54.
53. Пономарев Б.Б., Нгуен Ван Нам. Алгоритм минимизации холостых перемещений инструментов при фрезеровании сложных поверхностей на трёхкоординатных станках с ЧПУ / Б.Б. Пономарев, Нгуен Ван Нам // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – Т. 2. – № 2(20). – С. 85-89.
54. Пономарев Б.Б., Нгуен Ван Нам. Алгоритм минимизации холостых перемещений инструмента при фрезеровании сложных поверхностей / Б.Б. Пономарев, Нгуен Ван Нам // Вестник ИрГТУ. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2012. – № 11. – С. 64-68.
55. Пономарев Б.Б., Нгуен Ван Нам. Алгоритм определения последовательности обработки и минимизации холостых перемещений станка при фрезеровании сложных поверхностей / Б.Б. Пономарев, Нгуен Ван Нам // «Авиамашиностроение и транспорт Сибири – 2014»: сб. науч. тр. студентов и преподавателей Института авиамашиностроения и транспорта. – Иркутск : Издво ИрГТУ, 2014. – С. 178–185.
56. Пономарёв Б.Б., Нгуен Ван Нам. Алгоритм оптимизации вспомогательных 125 перемещений инструментов при фрезеровании сложных поверхностей / Б.Б. Пономарев, Нгуен Ван Нам // Вестник ИрГТУ. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2013. – №1. – С. 33-37.
57. Пономарев Б.Б., Нгуен Ван Нам. Программа определения последовательности обработки и минимизации холостых перемещений станка при фрезеровании сложных поверхностей / Б.Б. Пономарев, Нгуен Ван Нам // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615919 от 05 июня 2014 г. / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный технический университет». – 2014.
58. Пономарев Б.Б., Нгуен Ван Нам. Способ определения минимальных холостых перемещений инструментов различных типоразмеров при фрезеровании сложных поверхностей на трёхкоординатных станках с ЧПУ / Б.Б. Пономарев, Нгуен Ван Нам // VII

всерос. конф. молод. уч-ых и спец-ов «Будущее машиностроения России» (Москва, 24-25 сентября, 2014г.) – М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – С.161–164.

59. Пономарев Б.Б., Репин В.М. Автоматизация конструкторско-технологических работ в подготовке производства труб гидрогазовых систем летательных аппаратов / Б.Б. Пономарев, В.М. Репин // Межрегиональная конференция «Материалы, технологии, конструкции». Сборник материалов. – В двух частях. – Часть 2. – Красноярск: Сибирская аэрокосмическая академия, 1996. – С. 3-4.

60. Пономарев Б.Б., Репин В.М. Метод автоматического нахождения оптимальных параметров стратегий чистового фрезерования сложных деталей / Б.Б. Пономарев, В.М. Репин // Всероссийская научно-техническая конференция «Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве». Тезисы докладов. – В 19 частях. – Часть 2. – Нижний Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т, 1999. – С.11-14.

61. Пономарев Б.Б., Репин В.М. Повышение производительности формообразования сложных деталей на фрезерных станках с ЧПУ / Б.Б. Пономарев, В.М. Репин // Вестник ИрГТУ, 1998. – № 3. – с.50-53.

62. Пономарев Б.Б., Шленский Я.Ю. Модель профилирования производящей поверхности инструмента при трехкоординатном фрезеровании сложных поверхностей / Б.Б. Пономарев, Я.Ю. Шленский // Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах: Материалы III международной научно-технической конференции. – Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2002. – Часть 1. – С. 48-50.

63. Препарата Ф. Вычислительная геометрия: Введение / Ф. Препарата, М. Шеймос. – М.: Мир, 1989. – 478 с.

64. Проектирование технологии автоматизированного машиностроения: Учеб. для машиностроит. спец. вузов / И.М. Баранчукова, А.А. Гусев, Ю.Б. Крамаренко и др.; Под ред. Ю.М. Соломенцева. – 2-е изд. – М.: Высш. Шк., 1999. – 416 с.

65. Радзевич С.П. Формообразование поверхностей деталей / С.П. Радзевич. – Растан, 2001. – 592 с. 66. Радзевич С.П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ / С.П. Радзевич. – К.: Выща шк., 1991. – 192 с.

67. Репин В.М. Метод автоматического выбора стратегий чистовой обработки деталей сложной формы на трехкоординатном фрезерном станке с ЧПУ / В.М. Репин // Вестник ИрГТУ, 1998. – № 3. – С. 54-59.

68. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П.Р. Родин. – К.: Вища шк., 1977. – 192с.

69. Родин П.Р., Линкин Г.А., Татаренко В.Н. Обработка фасонных поверхностей на станках с числовым программным управлением / П.Р. Родин, Г.А. Линкин, В.Н. Татаренко. – К.: Техника, 1976. – 200 с.

70. Рыжов Э.В., Авергенков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э.В. Рыжов, В.И. Авергенков. – Отв. ред. А.П. Гавриш. – К.: Наук. думка, 1989. – 192с.
71. Семенченко Д.И. Инструмент для станков с программным управлением и его рациональная эксплуатация / Д.И. Семенченко // Рациональная эксплуатация высокопроизводительного режущего инструмента. – М.: МДНТП, 1972. – С. 126-134.
72. Сосонкин В.Л. Программное управление технологическим оборудованием: Учебник для вузов по специальности “Автоматизация технологических процессов и производств” / В.Л. Сосонкин. – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.
73. Спиридонов А.А., Федоров В.Б. Металлорежущие станки с программным управлением / А.А. Спиридонов, В.Б. Федоров. – М., «Машиностроение», 1972. – 352 с.
74. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А.М. Дальского. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 912 с.
75. Тетерин Г.П. Интегрированные автоматизированные системы конструирования и изготовления штампов / Г.П. Тетерин. М.: ЦНИИТЭИ тракторосельмаш, 1984. – вып. 12. – 40 с.
76. Технология машиностроения: В 2 т. Т.1. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С.Васильев, А.М.Дальский и др.; Под ред. А.М.Дальского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. – 564 с.
77. Технология машиностроения: В 2 т. Т.2. Производство машин: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, О.М. Деев и др.; Под ред. Г.Н. Мельникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. – 640 с.
78. Фокс А., Пратт М. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве: Пер. с англ. / А. Фокс, М. Пратт – М.: Мир, 1982. – 304 с.
79. Харьков Б.А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхности резанием. Перепелица / Б.А. Харьков. – Вища школа, 1981. – 152 с.
80. Шейнин Л.Б. Автоматическая смена инструментов на станках с числовым программным управлением: Методическое пособие по курсу «Автоматизация технологических процессов» / Л.Б. Шейнин. – Тула, 1973. – 245 с.
81. Шикин Е.В., Боресков А.В. Компьютерная графика. Полигональные модели / Е.В. Шикин, А.В. Боресков – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 464 с.
82. Шикин Е.В., Плис А.И. Кривые и поверхности на экране компьютера. Руководство по сплайнам для пользователей / Е.В. Шикин, А.И. Плис. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1996. – 240 с.

83. Азотов А.С., Сальников В.С. Оптимизация траектории перемещения инструмента в многооперационных станках / А.С. Азотов, В.С. Сальников // Автоматизация и информатизация в машиностроении (АИМ 2001). – Тула: Гриф и К, 2001. – С. 66-72.
84. Baldacci R., Hadjiconstantinou E., Mingozzi A. An Exact Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem Based on a Two-Commodity Network Flow Formulation / R. Baldacci, E. Hadjiconstantinou, A. Mingozzi // Operations Research, 2004. – vol. 52. – P. 723-738.
85. Barnhill R.E., Farin G., Fayard L. Twists, Curvatures and Surface Interrogation / R.E. Barnhill, G. Farin, L. Fayard, H. Hagen // Computer Aided Design, 1988. – Vol. 20. – № 6. – P. 341-346.
86. Beck J.M., Farouki R.T., Hinds J.K. Surface Analysis Methods / J.M. Beck, R.T. Farouki, J.K. Hinds // IEEE Computer Graphics and Application, 1986. – Vol. 6. – № 12. – P. 18-36.
87. Casale M.S. Free-Form Solid Modeling with Trimmed Surface Patches / M.S. Casale // IEEE Computer Graphics and Applications, 1987. – Vol. 7. – № 1. – P. 33-43.
88. Casco D., Golden B., Wasil E. Vehicle routing with backhauls: Models, algorithms and case studies / D. Casco, B. Golden, E. Wasil // Vehicle Routing: Methods and Studies. – Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988. – P. 127–147.
89. Chen Y.H., Lee Y.S., Fang S.C. Optimal Cutter selection and machining plane determination for process planning and NC machining of complex surfaces / Y.H. Chen, Y.S. Lee, S.C. Fang // Journal of Manufacturing Systems, 1998. – Vol.17. – № 5. – P. 371-388.
90. Chen Y.J., Ravani B. Offset surface generation and contouring / Y.J. Chen, B. Ravani, J. Mech // Trans. auto. des., 1987. – № 109. – P. 133-142.
91. Choi B.K., Kim D.H., Jerard R.B. C-space approach to tool-path generation for die and mould machining / B.K. Choi, D.H. Kim, R.B. Jerard // Computer Aided Design, 1997. – № 29(9). – P. 657-669.
92. Clarke G. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points / G. Clarke, J.W. Wright // Operations Research, 1964. – № 12. – P. 568-581.
93. Cohen E., Lych T., Schumaker L. Algorithms for degree raising for splines / E. Cohen, T. Lych, L. Schumaker // ACM Transactions on Graphics, 1986. – Vol. 4. – № 3. – P. 171-181.
94. Cohen E., Lych T., Schumaker L. Degree faising for splines / E. Cohen, T. Lych, L. Schumaker // Journal of Approximation Theory, 1986. – Vol. 46. – P. 353-361.
95. Cordeau J. F., Laporte G., Røpke S. Recent models and algorithms for one-toone pickup and delivery problems / J. F. Cordeau, G. Laporte, S. Røpke // The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. – Springer, 2008. – P. 327–357.

96. D. Aksen. Open vehicle routing problem with driver nodes and time deadlines / D. Aksen, Z. zyurt, N. Aras // Journal of the Operational Research Society, 2006. – Vol. 58. – Iss. 9. – P. 255-261
97. Dill J.C. An Application of Color Graphics to the Display of Surface Curvature / J.C. Dill // SIGGRAPH, 1981. – P. 153-161.
98. Elber G. Free Form Surface Analysis Using a Hybrid of Symbolic and Numerical Computation / G. Elber // PhD Thesis, Dept. of Computer Science, Univ. of Utan, 1992. – P. 401-411.
99. Elber G. Free-form surface region optimization for three- and five-axis milling / 130 G. Elber // Comput. Aided Geom. Design, 1995. – № 27, P. 465-470.
100. Elber G., Cohen E. Hidden Curve Removal for Free Form Surfaces / G. Elber, E. Cohen // SIGGRAPH 90, 1990. – P. 95-104.
101. Elber G., Cohen E. Tool path generation for freeform surface models / G. Elber, E. Cohen // Computer-Aided Design, 1994. – № 26. – P. 490-496.
102. Elber. G. Free Form Surface Analysis using a Hybrid of Symbolic and Numeric Computation / G. Elber // Ph.D. thesis, University of Utan, Computer Science Department, 1992. – P. 381-394.
103. Farin G. Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design / G. Farin // Academic Press, Inc. Second Edition, 1990. – P. 96-105.
104. Farouki R.T., Rajan V.T. On the numerical condition of polynomial in bernstein form / R.T. Farouki, V.T. Rajan // Computer Aided Geometric Design 4, 1987. – P.191-216.
105. Fisher M.L. A generalized assignment heuristic for vehicle routing / M.L. Fisher, R. Jaikumar // Networks, 1981. – № 11. – P. 109-124.
106. Gaskell T.J. Bases for vehicle fleet scheduling / T.J. Gaskell // Operational Research Quarterly, 1967. – № 18. – P. 281-295.
107. Gendreau M., Dejax P., Feillet D. Vehicle routing with time windows and split deliveries / M. Gendreau, P. Dejax, D. Feillet, C. Gueguen // Technical Report 851. – Avignon: Laboratoire d'Informatique d'Avignon, 2006. – P. 245-253.
108. Gillett B., Miller L. Heuristical gorithm for vehicle-dispatch problem / B. Gillett, L. Miller // Operations Research, 1974 – № 22(2). – P. 340-349.
109. Glaeser G., Wallner J., Pottmann H. Collision-free 3-axis milling and selection of cutting tools / G. Glaeser, J. Wallner, H. Pottmann // Computer-Aided Design, 1999. – № 31. – P. 224-232.
110. Golden B., Magnanti T., Nguyen H. Implementing vehicle routing algorithms / B. Golden, T. Magnanti T., H. Nguyen // Networks, 1977. – № 7(2). – P. 113-148.

111. Guyder M.K. Automating the optimization of 2 2 1 Axis milling / B. Golden, T. Magnanti T., H. Nguyen // Computers in Industry, 1990. – Vol. 15. – P. 163-168.
112. Han Z., Yang D. Isophote based machining for feature intensive surfaces / Z. Han, D. Yang // Proceeding of the ASME Manufacturing Science and Engineering Division, 1998. – P.483-495.
113. Hanta A., Grieve R.J., Broomhead P. Automatic CNC milling of pockets: geometric and technological issues / A. Hanta, R.J. Grieve, P. Broomhead // Computer Integrated Manufacturing Systems, 1998. – Vol.11. – No.4. – P.309-330.
114. Jensen C.G., Anderson D.C. Accurate tool placement and orientation for finish surface machining Proceedings of the symposium of Concurrent Engineering / C.G. Jensen, D.C. Anderson // ASME winter annual meeting, 1992. – P. 168-175.
115. Kritikos M.N. The balanced cargo vehicle routing problem with time windows / M. N. Kritikos, G. Ioannou // International Journal of Production Economics, 2010. – Vol. 123. – Issue 1. – P. 42-51.
116. Laporte G. Classical Heuristics for the Vehicle Routing Problem / G. Laporte, F. Semet // Les Cahiers du GERAD, G98-54, Group for Research in Decision Analysis. – Montreal, Canada, 1998. – P. 234-239.
117. Lee R.T., Fredericks D.A. Intersection of parametric Surface and a Plane / R.T. Lee, D.A. Fredericks // IEEE Computer Graphics and Applications, 1984. – Vol. 4. – № 8. – P. 48-51.
118. Lee Y.S. Non-isoparametric tool path planning by machining strip evaluation for 5-axis sculptured surface machining / Y.S. Lee // Computer-Aided Design, 1998. – № 30. – P. 559-570.
119. Lee Y.S., Chang T.C. Application of computational geometry in optimization 2.5D and 3D NC surface machining / Y.S. Lee, T.C. Chang // Computers in Industry, 1995. – № 26(1). – P. 41-59.
120. Lee Y.S., Chang T.C. Automatic cutter selection for 5-axis sculptured machining / Y.S. Lee, T.C. Chang // Int. J. Production Research, 1996. № 34. – P. 997-998.
121. Li H., Dong Z., G. Vicker W. Optimal toolpath pattern identification for single island, sculptured part rough machining using fuzzy pattern analysis / H. Li, Z. Dong, G. W. Vicker // Computer Aided Design, 1994. – № 26(11). –P. 787-795.
122. Lim T. Optimizing automatic tool selection for 2 2 1 D components / T. Lim, J. Corney, J.M. Ritchie, J. Corney // Information in Engineering Conference Baltimore, Maryland, 2000. – P. 10-13.
123. Lin R.S., Koren Y. Efficient tool-path planning for machining free-form surfaces / R.S. Lin, Y. Koren // Transactions of the ASME, 1996. – Issue 118. – P. 20-28.

124. Lo C.C. A new approach to CNC tool path generation / C.C. Lo // ComputerAided Design, 1998. – vol. 30. – P. 649-655.
125. Nguyen Van Nam, Ponomarev B.B. The Optimization Of Auxiliary Movement Of The Cutting Tool During The Milling Of Complex Surfaces On 3-Axis CNC Machine/ Nguyen Van Nam, B.B. Ponomarev // International Journal of Applied Engineering Research. – 2014. – Vol. 9. – № 24. – PP. 27655-27666.
126. Paessens H. The savings algorithm for the vehicle routing problem / H. Paessens // European Journal of Operational Research, 1988. – № 34. – P. 336- 344.
127. Pisinger D., Ropke S. A general heuristic for vehicle routing problems / D. Pisinger, S. Ropke // Computers & Operations Research, 2007. – Vol. 34. – Issue 8. – P. 2403-2435.
128. Pottmann H. General Offset Surfaces / H. Pottmann // Neural, Parallel & Scientific Computations, 1997. – Issue 5. P. – 55-80.
129. Pottmann H., Wallner J., Glaeser G. Geometric criteria for gouge-free three-axis milling of sculptured surfaces / H. Pottmann, J. Wallner, G. Glaeser, G. Ravani // ASME J. of Mechanical Design, 1999. – Issue 121. – P. 241-248.
130. Potvin J.Y. A genetic algorithm for vehicle routing with backhauling / J.Y. Potvin, C. Duhamel, F. Guertin // Applied Intelligence, 1996. – № 6. – P. 345-355.
131. Regli W.C. Geometric Algorithms for Recognition of Features from Solid Models / W.C. Regli // PhD. Dissertation, University of Maryland, 1995. – P. 56-68.
132. Satterfield S.C., Rogers D.F. A Procedure for Generating Contour Lines From a Baseline Surface / S.C. Satterfield, D.F. Rogers // IEEE Computer Graphics and Applications, 1985. – Vol. 5. – № 4. – P. 71-75.
133. Scurlock R. and Fallbohmer P. Milling Sculptured Surfaces, Cutting Tool / R. 133 Scurlock, P. // Fallbohmer Engineering Magazine, 1996. – P. 35-46.
134. Sederberg T.W., Zundel A.K.. Scan Line Display of Algebraic Surfaces / T.W. Sederberg, A.K. Zundel // SIGGRAPH, 1989. – P. 147-156.
135. Shaw P. Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems / P. Shaw // In CP-98 (Fourth International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming), 1998. – Vol. 1520. – P. 417-431.
136. Spivak M. A Comprehensive Introduction to Differential Geometry / M. Spivak // Publish or Perish, Houston, 1979. – P. 56-71.
137. Sun G., Wang F., Wright P. Operation Decomposition for Freeform Surface Features in Process Planing / G. Sun, F. Wang, P. Wright, C. Sequin // ASME Design Engineering Technical Conferences. – Las Vegas, Nevada, 1999. – P. 426-435.

138. Sun Y.S., Lee K. NC milling tool path generation for arbitrary pockets defined by sculptured surfaces / Y.S. Sun, K. Lee // Computer-Aided Design, 1990. – Issue 22. – P. 273-284.
139. Tangelder J.W. Interference-free NC machining using spatial planning and Minkowski operations / J.W. Tangelder, J.S. Vergeest, M.H. Overmars // ComputerAided Design, 1998. – Issue 30. – P. 277-286.
140. The vehicle routing problem: In N. Christofides, A. Mingozzi, P. Toth, C. Sandi editors / N. Christofides, A. Mingozzi, P. Toth // Combinatorial Optimization. – Wiley, Chichester, 1979. – P. 315-338.
141. Toth P., Vigo D. The Vehicle Routing Problem / P. Toth, D. Vigo // Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002. – 367 p.
142. Treng Y.J., Joshi S. Determining feasible tool-approach directions for machining Bezier curves and surfaces / Y.J. Treng, S. Joshi // Computer-Aided Desing, 1991. – Issue 23. – P. 367-378.
143. Wallner J. Configuration space for surface-surface contact / J. Wallner // Geometriae Dedicata, 2000. – Issue 80. – P. 173-185.
144. Wallner J. Smoothness and Self-Intersection of General Offset Surfaces / J. Wallner // Geometry, 2001, – Issue 70. – P. 176-190.
145. Wallner J., Glaeser G., Pottmann H. Geometric Contribution to 3-Axis Milling of Sculptured Surfaces / J. Wallner, G. Glaeser, H. Pottmann // Machining Impossible Shapes, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999. – P. 33-41.
146. Wallner J., Pottman H. On the geometry of sculptured surface machining, Curve and Surface Design / J. Wallner, H. Pottman // Vanderbilt University Press, Nashville, 2000. – P. 417-432.
147. Yang D.C., Han Z. Interference detection and optimal tool selection in 3-axis NC machining of free-form surfaces / D.C. Yang, Z. Han // Computer-Aided Design, 1999. – Vol. 31. – P. 303-315.
148. Yellow P. A computational modification to the savings method of vehicle scheduling / P. Yellow // Operational Research Quarterly, 1970. – № 21. – P. 281- 283.
149. Zhu C. Tool-path generation in manufacturing sculptured surfaces with a cylindrical end-milling cutter / C. Zhu // Computers in Industry, 1991. – № 7. – P. 385-389.
150. Siemena NX [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/products/nx/formanufacturing/cam/index.shtml.
151. Autodesk PowerMill [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.powermill.com/ru/>.
152. Archetti C., Hertz A., Speranza M.G. A tabu search

algorithm for the split delivery vehicle routing problem / C. Archetti, A. Hertz, M.G. Speranza // *Transportation Science*, 2006. – Vol. 40. – P. 64-73.

152. Грицай І.Є. Метод оцінки динамічної характеристики металорізального верстата обладнання // *Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2002. – № 467. – С. 114–118. 2.

Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.

153. Каминская В.В. Исследование динамики тяжелых карусельных станков // *Станки и инструмент*. – 1984. – № 12. – С. 8–12.

154. Методы автоматизированного исследования вибраций машин: Справочник / А.С. Добрынин, М.С. Фельдман, Г.И. Фирсов. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

155. Pogribny W., Rozhankivsky I., Hren Y. Adaptive Local-Stationarity Research Algorithm Based on the Moving Windows // *Proceedings of International Conference on Modern Problems of Telecommunications, Computer Science and Engineers Training, Lviv-Slavskop*. – 2000. – P. 104–105.

156. Погрібний В.О., Рожанківський І.В., Грень Я.В. Використання різницевих підходів для діагностики дефектів енергетичного обладнання // *Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 1999. – № 371. – С. 127–132.